

Mauro Apolinario da Luz

**ESTUDO COMPARATIVO DA TAXA DE
DEPOSIÇÃO E EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO
ENTRE OS PROCESSOS FCAW (E71T-1C) E
GMAW (ER70S-6)**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Outubro/2012

Mauro Apolinario da Luz

(Tecnólogo de Soldagem, FATEC - SP, 1989)

**ESTUDO COMPARATIVO DA TAXA DE
DEPOSIÇÃO E EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO
ENTRE OS PROCESSOS FCAW (E71T-1C) E
GMAW (ER70S-6)**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração:

Engenharia da Soldagem

Orientador:

Professor Doutor Sergio Duarte Brandi

São Paulo

Outubro/2012

"Quem sabe concentrar-se numa coisa e insistir nela com o único objetivo, obtém, ao cabo, a capacidade de realizar qualquer coisa."

Mahatma Gandhi

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha querida esposa Fátima Fernandes Marrão da Luz, que mesmo com tantas dificuldades na vida pessoal, soube compreender e incentivar-me ao longo destes dois anos, e aos meus filhos Rafael e Karen, por me motivarem na realização deste curso.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Sérgio Duarte Brandi pelo apoio e orientação na execução deste trabalho;

À minha esposa Fátima e filhos Rafael e Karen pela paciência e compreensão durante todo o período que me ausentei da família para dedicar-me a este curso;

Aos Srs Jeremias Antônio da Silva e Roberto Milhomem Martins, da empresa Belgo Bekaert Arames – Gerência de Marketing, pelo investimento feito em mim para a realização desta especialização;

À empresa Belgo Bekaert Arames pelo fornecimento dos consumíveis (arame sólido – fabricação própria e arame tubular – importado da Hyundai – made in Korea)

Aos colegas, Edson Takagi, Flavio Antonio Lima, Osvaldo Luiz de Lima, José Carlos Torres e Antônio Carlos Dias de Oliveira, da empresa Belgo Bekaert Arames (Osasco-SP), pela grande ajuda na preparação das 144 macrografias;

Aos colegas Daniel Kenji Shimizu e José Vilas Boas da Silva, da empresa Belgo Bekaert Arames (Contagem-MG), pela ajuda na busca de informações técnicas;

Ao professor Dr. Freddy Poetscher pela ajuda na análise estatística dos resultados;

Ao colega Dany Michel Andrade Centeno pela ajuda na confecção das micrografias e macrografias;

Aos colegas Marcos Fernandes da Silva, Ricardo Camargo e à diretoria da empresa Metalúrgica Atlas, pela grande ajuda na execução do experimento, pois sem isso seria impossível realizar este trabalho;

Aos amigos do curso de Especialização em Engenharia de Soldagem do PECE da Escola Politécnica da USP, pelo companheirismo que tornou a caminhada menos árdua durante estes dois anos;

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta na execução deste trabalho.

CURRICULUM VITAE

Experiência Profissional:

BELGO BEKAERT ARAMES - desde 04/2010 - Analista de Soldagem

- Atuação no atendimento de clientes e vendedores internos com treinamentos, consultoria em processos de soldagem;
- Desenvolvimentos de novos acessórios, embalagens, dispositivos e material didático para treinamentos;

SODECIA GROUP - de 11/2006 a 03/2010 - Tecnólogo de Soldagem

- Coordenador de projetos de Melhoria Contínua;
- Coordenação de projetos de automação e implantação de novos equipamentos.

BICICLETAS MONARK SA - de 04/1992 a 06/2006 – Sup. de Produção

- Supervisão da área de soldagem automática de peças
- Supervisão das áreas de corte, usinagem, conformação mecânica, estamparia e soldagem a ponto, recuperação de peças soldadas e recebimento de materiais.

LANCER SOLDAS LTDA - de 06/1989 a 04/1992 - Assessor técnico

- Consultoria em solda de manutenção e elaboração de EPS;
- Treinamentos técnicos para clientes e vendedores internos;
- Visitas técnicas para solucionar problemas na soldagem.

FERROVIA PAULISTA SA - de 08/1981 a 06/1989 – Téc. de Manutenção

- Projetos de pequenos equipamentos e dispositivos;
- Elaboração de manuais de manutenção e layout industrial;
- Desenvolvimento de fornecedores e análise de licitações.

Formação Acadêmica:

- Especialização em Engenharia de Soldagem /Poli-USP/Ago10-Jul12
- Tecnologia Mecânica em Soldagem / FATEC-SP / 1985-89
- Técnico em Projetos / Colégio Fernão Dias Paes / 1982-84
- Aprendizagem Industrial / SENAI Nadir Dias Figueiredo / 1979-81
- Diversos cursos extracurriculares como: AutoCAD, PFMEA, APQP, KAIZEN, Robótica, Inspetor de solda N1.

Idioma:

Inglês intermediário

Perfil Pessoal:

Brasileiro, casado, dois filhos, nascido em 21/11/1964. Perfil dinâmico, fácil comunicação e com foco nos resultados.

RESUMO

Entre todos os métodos de união de metais na fabricação de peças e estruturas a soldagem ocupa hoje um lugar de destaque e vem sendo o mais importante devido às opções existentes com diversos processos, diversos tipos de equipamentos automáticos, manuais e semi automáticos e ainda diversos tipos de consumíveis. Entre todos os consumíveis encontrados para as mesmas aplicações como a soldagem de aço baixo carbono, onde se busca altas velocidades de soldagem para melhorar a produtividade, é grande a competitividade existente entre dois tipos, o arame tubular e o arame sólido. Diante de tantos mitos criados sobre os resultados possíveis com estes consumíveis, os consumidores se sentem muitas vezes confusos.

Neste trabalho buscou-se apresentar uma comparação entre a soldagem com os dois tipos de arame, sólido e tubular, AWS A5.18 ER70S-6 e AWS A5.20 E71T-1C respectivamente, no que diz respeito à **taxa de deposição** e à **eficiência de deposição**, especificamente na posição plana horizontal, com diferentes parâmetros, com o objetivo de entender em quais condições se pode obter os mesmos resultados e em quais situações podemos verificar as vantagens de um sobre o outro.

As taxas de deposição foram medidas usando-se uma seqüência de cordões de solda realizados em simples deposição sobre chapa de aço ASTM A36. As variáveis utilizadas foram o gás de proteção (CO₂ e Mistura Ar+25%CO₂), a DBCP (Distância do Bico de Contato à Peça - 12 e 20 mm) e a intensidade de corrente (200 e 250 A). A progressão da soldagem foi feita com cordão reto,

sem oscilações. A tensão de soldagem foi ajustada buscando uma largura de cordão similar aos dois arames.

Os resultados obtidos na soldagem mostraram que na corrente de 200 A o arame sólido apresenta maior taxa de deposição e em 250 A o tubular passa a ter a taxa de deposição mais elevada que a do arame sólido. A eficiência de deposição medida nestes mesmos valores de corrente, com CO₂ e com mistura (Ar+25%CO₂), foi maior no arame sólido.

As principais variáveis para se obter os melhores resultados nesta soldagem foram a intensidade de corrente e a DBCP para os dois arames.

ABSTRACT

Among all methods of joining metals in the manufacture of parts and welding structures now occupies a place of prominence and has been the most important because of the options available with different processes, different types of automatic, manual and semi automatic and even various types consumables. Among all consumables found for the same applications as welding low carbon steel, where one seeks high weld speeds to improve productivity, there is great competition between two types, the cored wire and solid wire. With so many myths about the possible outcomes with these consumables, consumers often feel confused. In this study, we attempted to present a comparison between the two types welding wire, solid and tubular, AWS A5.18 ER70S-6 and AWS A5.20 E71T-1C respectively, in relation to the deposition rates and deposition efficiency, specifically in horizontal flat position, with different parameters, in order to dislodge under what conditions one can obtain the same results and situations in which we can see the advantage of one over another. Deposition rates were measured using a sequence of weld beads made in simple deposition on steel ASTM A36. The variables used were the shielding gas (CO₂ and Mixture Ar+25%CO₂), the CTWD (Contact Tip to Work Distance - 12 and 20 mm) and current intensity (200 and 250 A). The progression of the weld bead was made with straight, without oscillations. The welding voltage was adjusted searching similar strand width on the two wires. The

results showed that in the welding current of 200 A solid wire provides higher deposition rate and A the tubular 250 is replaced by the deposition rate higher than the solid wire. The deposition efficiency measured in these same current levels, with pure CO₂ and gas mixture (Ar+25%CO₂), was higher in solid wire. The main variables to obtain the best results in this welding were the intensity of current intensity and CTWD for the two wires.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Soldagem com proteção gasosa [4].....	05
Figura 2.2 – Soldagem sem gás de proteção [4].....	06
Figura 2.3 – Representação esquemática do processo MIG-MAG.....	10
Figura 2.4 – Equipamentos básicos para a soldagem MIG-MAG e Arame Tubular (GMAW e FCAW respectivamente).....	16
Figura 2.5 – Efeito da variação do comprimento do arco na corrente de soldagem de tensão constante [5].....	17
Figura 2.6 – Roldana lisa e roldana recartilhada, recomendadas para arame sólido e arame tubular respectivamente [11].....	18
Figura 2.7 - Comparação das seções transversais dos dois arames.....	21
Figura 2.8 – Geometria do cordão de solda. Formação do finger no arame maciço e cordão mais largo e raso no arame tubular [4].....	23
Figura 2.9- Foto de seção transversal das soldas com o arame sólido (maciço) e tubular.....	24
Figura 2.10 – Taxa de deposição de arames sólidos e tubulares [14].....	25
Figura 2.11 – Influência da DBCP na corrente de soldagem [15].....	26
Figura 2.12 – Efeito da DBCP na corrente e na taxa de deposição [15].....	27
Figura 2.13 – Modos de transferência de metal e a sua relação com a corrente e a tensão da soldagem [18].....	28
Figura 2.14 - Transferência Pulsada: A gota de metal é transferida durante o período de corrente de base baixa [18].....	29

Figura 2.15 - Modos de transferência conforme classificação do IIW [19].....	31
Figura 2.16 - Proposta de classificação dos modos de transferência [21].....	32
Figura 2.17 – Imagens de uma filmagem de alta velocidade de transferência metálica globular [17].....	33
Figura 2.18 – Oscilograma de corrente na transferência globular de uma soldagem com arame AWS ER70S-6, diâmetro de 1,2 mm, gás de proteção Ar+25%CO ₂ [31].....	34
Figura 2.19 – Oscilograma de tensão na transferência globular, arame AWS ER70S-6, diâmetro de 1,2 mm, gás de proteção Ar+25%CO ₂ [31].....	35
Figura 2.20 – Ilustração esquemática da transferência globular Repulsiva [33-34].....	36
Figura 2.21 – Pequenas gotículas projetadas através do arco durante a transferência por Spray [18].....	37
Figura 2.22 - Oscilograma de uma soldagem com transferência por spray. Arame ER 70S-6 de 1,20mm de diâmetro e gás Ar+4%CO ₂ [36].....	38
Figura 2.23 - Transferência por spray projetado a 300 A [39].....	39
Figura 2.24 - Transferência por spray com alongamento a 360 A [39].....	40
Figura 2.25 - Transferência por spray rotacional a 480 A [39].....	41
Figura 2.26 - Gota de metal fundido sendo transferida através do curto circuito [18].....	42

Figura 2.27 – Transferência por curto circuito - representação esquemática [36].....	44
Figura 2.28 – Oscilograma de corrente durante a transferência metálica por curto-circuito, arame AWS ER70S-6, diâmetro de 1,2 mm, gás de proteção Ar+2%O ₂ [31].....	44
Figura 2.29 – Oscilograma de tensão durante a transferência metálica por curto-circuito, arame AWS ER70S-6, Diâmetro de 1,2 mm, gás de proteção Ar+2%O ₂ [31].....	45
Figura 2.30 - Terminologia aplicada em GMAW-P: I _p - corrente de pico, I _b - corrente de base, I _c - corrente de transição, I _m - corrente média, t _p - tempo de pico e t _b - tempo de base [45-25].....	48
Figura 2.31 - Oscilogramas de corrente e tensão em GMAW-P: arame ER70S-6; com 1,2 mm de diâmetro, gás de proteção Ar+2%O ₂ [48].....	49
Figura 4.1 – Foto da bancada do experimento com todos os equipamentos montados. Legenda: 1 Notebook; 2 Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem – IMC; 3 Sistema de deslocamento linear; 4 Arame tubular E71T-1C; 5 Arame sólido ER70S-6; 6 Alimentador de arame e fonte de energia; 7 Balança de precisão; 8 Cronômetro; 9 Metal base; 10 Água para resfriamento da peça.....	52
Figura 4.2 - Dimensões da chapa de aço ASTM A36.....	53
Figura 4.3 – Sistema portátil de monitoramento de processos de soldagem IMC.....	54
Figura 4.4 – Tocha seca manual adaptada para soldagem automática usada no experimento.....	55

Figura 4.5 – Ilustração do bocal e da DBCP usado no experimento.....	56
Figura 4.6 – Foto do sistema de deslocamento linear de soldagem utilizado no experimento e foto de um modelo similar novo.....	57
Figura 4.7 – Balança eletrônica de precisão utilizada no experimento.....	57
Figura 4.8 – Representação esquemática da montagem experimental.....	62
Figura 4.9 - Matriz de experimentos com as 16 combinações possíveis de parâmetros.....	62
Figura 4.10 - Corpo de prova com os três cordões de solda.....	63
Figura 4.11 - Exemplo de identificação de cada cordão de solda realizado.....	64
Figura 4.12 - (a) Oscilograma de corrente; (b) oscilograma de tensão; (c) Oscilograma de velocidade de alimentação de arame. Cordão de solda (nº19) com o arame ER70S-6, DBCP de 12 mm, 250 A, 28 V e Gás CO ₂	65
Figura 4.13 - Método de preparação de amostras para macrografia.....	68
Figura 4.14 - Método de dimensionamento do cordão de solda.....	69
Figura 4.15 - Lupa estereoscópica, STEMI 2000-C (Zeiss, Germany).....	69
Figura 4.16 - Macroataque: 4% ácido pícrico (diluído em HCl +álcool).....	70
Figura 4.17 - Ilustração das áreas definidas na seção transversal do cordão de solda.....	71
Figura 5.1 - (a) Foto do arame sólido com 5X de aumento. (b) Seção transversal do arame sólido com diâmetro de 1,2 mm e aumento de 50X.....	73

Figura 5.2 - (a) Foto do arame tubular com 5X de aumento.	
(b) Seção transversal do arame tubular com diâmetro de 1,2 mm e aumento de 50X.....	74
Figura 5.3 - Gráfico dos principais efeitos para a largura média.....	78
Figura 5.4 - Gráfico de interação para a largura média.....	78
Figura 5.5 - Largura do cordão = 11,24 mm (com sobreposição). Macrografia do cordão nº 45 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 20 mm, 31 V, corrente de 228 A e CO ₂ como gás de proteção.....	79
Figura 5.6 - Largura do cordão = 10,73 mm. Macrografia do cordão nº 31 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 20 mm, 30 V, corrente de 200 A e CO ₂ como gás de proteção.....	79
Figura 5.7 - Largura do cordão = 8,56 mm. Macrografia do cordão nº 80 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 20 mm, 27 V, corrente de 200 A e CO ₂ como gás de proteção.....	80
Figura 5.8 - Largura do cordão = 12,28 mm. Macrografia do cordão nº 92 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 20 mm, 26 V, corrente de 250 A e CO ₂ como gás de proteção.....	80
Figura 5.9 - Largura do cordão = 10,17 mm. Macrografia do cordão nº 2 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 12 mm, 25 V, corrente de 230 A e Mistura de Ar+25%CO ₂ como gás de proteção.....	81

Figura 5.10 - Largura do cordão = 12,85 mm. Macrografia do cordão nº 62 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 12 mm, 28 V, corrente de 252 A e Mistura de Ar+25%CO ₂ como gás de proteção.....	81
Figura 5.11 - Gráfico dos principais efeitos para a altura média.....	82
Figura 5.12 - Gráfico de interação para a altura média.....	82
Figura 5.13 - Altura do cordão = 3,29 mm. Macrografia do cordão nº 01 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 12 mm, 28 V, corrente de 230 A e Mistura de Ar+25%CO ₂ como gás de proteção.....	83
Figura 5.14 - Altura do cordão = 3,95 mm. Macrografia do cordão nº 45 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 20 mm, 31 V, corrente de 228 A e CO ₂ como gás de proteção.....	83
Figura 5.15 - Gráfico dos principais efeitos para a penetração média.....	84
Figura 5.16 - Gráfico de interação para a penetração média.....	84
Figura 5.17 - Penetração do cordão = 4,28 mm. Macrografia do cordão nº 21 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 12 mm, 30 V, corrente de 200 A e CO ₂ como gás de proteção.....	85
Figura 5.18 - Penetração do cordão = 1,54 mm. Macrografia do cordão nº 56 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 12 mm, 25 V, corrente de 200 A e CO ₂ como gás de proteção.....	85
Figura 5.19 - Gráfico dos principais efeitos para o ângulo do reforço médio...	86

Figura 5.20 - Gráfico de interação para o ângulo do reforço médio.....	86
Figura 5.21 - Ângulo do reforço Médio = 38,98°. Macrografia do cordão nº 92 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 20 mm, 26 V, corrente de 250 A e CO ₂ como gás de proteção.....	87
Figura 5.22 – Ângulo do reforço = 60,64°. Macrografia do cordão nº 86 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 20 mm, 26 V, corrente de 247 A e Ar+25%CO ₂ como gás de proteção.....	88
Figura 5.23 - Gráfico dos principais efeitos para a taxa de deposição.....	91
Figura 5.24 - Gráfico de interação para a taxa de deposição.....	91
Figura 5.25 - Gráfico dos principais efeitos para a eficiência de deposição.....	94
Figura 5.26 - Gráfico de interação para a eficiência de deposição.....	94
Figura 5.27 - Gráfico dos principais efeitos para a diluição média.....	97
Figura 5.28 - Gráfico de interação para a diluição média.....	97
Figura 5.29 - Diluição de 26,6 %. Macrografia do cordão nº 87 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 20 mm, 26 V, corrente de 225 A e mistura de Ar+25%CO ₂ como gás de proteção.....	98
Figura 5.30 - Diluição de 53,4 %. Macrografia do cordão nº 7 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 12 mm, 30 V, corrente de 210 A e CO ₂ como gás de proteção.....	98

Figura 5.31 - Gráfico dos principais efeitos para o diâmetro da gota.....	101
Figura 5.32 - Gráfico de interação para o diâmetro da gota.....	101
Figura 5.33 - Gráfico dos principais efeitos para o destacamento da gota....	105
Figura 5.34 – Gráfico de interação para o destacamento da gota	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Significados do quinto dígito – Usabilidade do eletrodo tubular quanto à polaridade, gás de proteção e técnica operatória.....	07
Tabela 2.2	Requisitos de composição química para o arame ou metal de solda (% peso).....	13
Tabela 2.3	Gases mais comuns usados na soldagem MIG-MAG.....	14
Tabela 2.4	Classificação dos modos de transferência metálica aceitos pelo IIW [23].....	31
Tabela 2.5	Influência dos parâmetros na soldagem com corrente pulsada [22].....	51
Tabela 4.1	Composição química típica do aço ASTM A36.....	54
Tabela 4.2	Composição química típica do metal depositado e da norma AWS.....	59
Tabela 4.3	Composição química, propriedades mecânicas e teste de impacto.....	60
Tabela 4.4	Parâmetros de solda utilizados com o arame ER70S-6.....	67
Tabela 4.5	Parâmetros de soldagem utilizados com o arame E71T-1C..	68
Tabela 5.1	Resultado das medições de laboratório da seção transversal de um arame tubular de 1,2 mm de diâmetro...	77
Tabela 5.2	Resultado das medições de laboratório da seção transversal de um arame sólido de 1,2 mm de diâmetro.....	77
Tabela 5.3	Tabela dimensional dos cordões do arame sólido ER70S-6..	78
Tabela 5.4	Tabela dimensional dos cordões do arame tubular E71T-1C	79
Tabela 5.5	Tabela da taxa de deposição do arame sólido ER70S-6.....	91
Tabela 5.6	Tabela da taxa de deposição do arame tubular E71T-1C.....	92
Tabela 5.7	Tabela da eficiência de deposição do arame sólido ER70S-6	94

Tabela 5.8	Tabela da eficiência de deposição do arame tubular E71T-1C.....	96
Tabela 5.9	Tabela do percentual de diluição média dos cordões do arame sólido ER70S-6.....	98
Tabela 5.10	Tabela do percentual de diluição média dos cordões do arame tubular E71T-1C.....	99
Tabela 5.11	Tabela do diâmetro médio da gota para o arame ER70S-6..	102
Tabela 5.12	Tabela do diâmetro médio da gota para o arame E71T-1C..	103
Tabela 5.13	Tabela do destacamento da gota para o arame ER70S-6.....	106
Tabela 5.14	Tabela do diâmetro médio da gota para o arame E71T-1C.	107

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

APQP	Advance Product Quality Planning
Al	Alumínio
ASTM	American Society for Testing and Materials
Ar	Argônio
AWS	American Welding Society
CO ₂	Dióxido de Carbono
C	Carbono
Cr	Cromo
Cu	Cobre
CTWD	Contact Tip to Work-piece Distance
DBCP	Distância do Bico de Contato à Peça
DIN	Deutsches Institut für Normung
DCEP	Corrente Contínua com Polaridade Positiva
DCEN	Corrente Contínua com Polaridade Negativa
ER	Electrode Rod
ESW	Electro Slag Welding
EPS	Especificação de Procedimento de Soldagem
EPI	Equipamento de proteção Individual
FCAW-G	Flux Cored Arc Welding – Gas Shielded
FCAW-S	Flux Cored Arc Welding – Self Shielded
FCAW	Flux Cored Arc Welding
FT	Fator de Trabalho
GMAW	Gas Metal Arc Welding
PH	Posição Horizontal
HCl	Ácido Clorídrico

He	Hélio
H2	Hidrogênio
IIW	Institute International of Welding
JIDOKA	Sistema automático de detecção de defeitos
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N2	Nitrogênio
Ni	Níquel
Si	Silício
P	Fósforo
PP	Posição Plana
PFMEA	Process Failure Mode Effects Analysis
POKA YOKE	Dispositivo à prova de erros
S	Enxofre
SAE	Society of Automobile Engineers
SC	Posição Sobre Cabeça
SAW	Submerged Arc Welding (Arco Submerso)
SMAW	Shielded Metal Arc Welding (Eletrodo Revestido)
STICK OUT	Extensão energizada do eletrodo
VA	Posição Vertical com Progressão Ascendente
VD	Posição Vertical com Progressão Descendente

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	II
AGRADECIMENTOS.....	III
CURRICULUM VITAE.....	V
RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	IV
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XVIII
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS.....	XX
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Soldagem com arame tubular.....	4
2.1.1 Fundamentos do processo.....	4
2.1.2 Consumíveis.....	6
2.1.2.1 Classificação.....	6
2.1.2.2 Fluxos e gases de proteção.....	9
2.1 Soldagem com arame sólido.....	9
2.2.1 Fundamentos do processo.....	9
2.2.2 Consumíveis.....	12
2.2.2.1 Classificação.....	12
2.2.2.2 Gases de proteção.....	13
2.3 Diferenças e semelhanças entre o processo FCAW (arame tubular) e GMAW (MIG-MAG).....	15
2.3.1 Equipamentos.....	16
2.3.2 Consumíveis.....	20
2.3.3 Geometria do cordão.....	23
2.3.4 Taxa de deposição.....	24
2.3.5 Transferência metálica.....	27
2.3.5.1 Transferência por voo livre.....	33
2.3.5.1.a – Transferência globular.....	33
2.3.5.1.a.1 Transferência por gotas.....	36
2.3.5.1.a.2 Transferência por repulsão.....	36

2.3.5.1.b – Transferência por spray.....	37
2.3.5.1.b.1 Transferência do tipo spray projetada.....	39
2.3.5.1.b.2 Transferência por spray com alongamento.....	40
2.3.5.1.b.3 Transferência do tipo spray rotacional.....	41
2.3.5.1.c – Transferência por explosão.....	42
2.3.5.2 Transferência por contato.....	43
2.3.5.2.a – Transferência por curto circuito.....	43
2.3.5.3 Transferência protegida pela escória.....	47
2.3.5.3.a – Transferência guiada pela parede..	47
2.3.5.2.b – Outros tipos de transferências.....	47
2.3.5.4 Transferência por arco pulsado.....	47
3. OBJETIVOS.....	52
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
4.1 Bancada de trabalho.....	53
4.1.1 Metal de base.....	54
4.1.2 Procedimento de soldagem utilizado.....	54
4.1.3 Aquisição de dados de soldagem.....	55
4.1.4 Fonte de energia.....	55
4.1.5 Tocha.....	56
4.1.6 Sistema de deslocamento linear.....	57
4.1.7 Balança de precisão.....	58
4.1.8 Consumíveis de soldagem.....	59
4.1.8.1 Arame sólido.....	59
4.1.8.1.a – Especificação do arame.....	59
4.1.8.1.b – Armazenamento.....	59
4.1.8.2 Arame tubular.....	60
4.1.8.2.a – Especificação do arame.....	60
4.1.8.2.b – Armazenamento.....	60
4.1.8.3 Gases de proteção.....	60
4.2 Experimento.....	61
4.2.1 Limpeza dos cordões.....	64
4.2.2 Resfriamento.....	64

4.2.3 Medições diversas.....	65
4.2.4 Medições com o sistema de aquisição de dados de soldagem.....	65
4.2.5 Macrografias.....	69
4.2.5.1 Método de preparação das amostras.....	69
4.2.6 Dimensões dos cordões de solda.....	69
4.2.7 Cálculo da taxa de deposição.....	71
4.2.8 Cálculo da diluição.....	72
4.2.9 Cálculo do diâmetro da gota.....	72
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
5.1 Caracterização dimensional dos consumíveis.....	74
5.2 Caracterização dimensional dos cordões de solda.....	77
5.2.1 Cordões de solda feitos com o arame sólido ER70S-6.....	77
5.2.2 Cordões de solda feitos com o arame tubular E71T-1C.....	78
5.2.3 Análise estatística dos resultados.....	79
5.2.3.1 Largura média do cordão.....	79
5.2.3.2 Altura média do cordão.....	83
5.2.3.3 Penetração média do cordão.....	85
5.2.3.4 Média dos ângulos do reforço.....	87
5.3 Medida da taxa de deposição.....	90
5.3.1 Taxa de deposição.....	90
5.3.1.1 Taxa de deposição dos cordões de solda com o arame sólido ER70S-6.....	90
5.3.1.2 Taxa de deposição dos cordões de solda com arame tubular E71T-1C.....	91
5.3.1.3 Análise estatística dos resultados.....	92
5.3.2 Eficiência de deposição.....	93
5.3.2.1 Eficiência de deposição do arame sólido ER70S-6.....	93
5.3.2.2 Eficiência de deposição dos cordões do aramé tubular E71T-1C.....	94
5.3.2.3 Análise estatística dos resultados.....	95
5.4 Medida da diluição.....	96

5.4.1 Diluição dos cordões de solda com o arame sólido ER70S-6.....	96
5.4.2 Diluição dos cordões de solda com o arame tubular E71T-1C.....	97
5.4.3 Análise estatística dos resultados.....	98
5.4.3.1 Diluição média no cordão.....	98
5.5 Cálculo do diâmetro da gota.....	100
5.5.1 Diâmetro médio da gota no arame sólido ER70S-6.....	100
5.5.2 Diâmetro médio da gota no arame tubular E71T-1C.....	101
5.5.3 Análise estatística dos resultados.....	102
5.6 Frequência de destacamento de gota.....	104
5.6.1 Frequência de destacamento de gota no arame sólido ER70S-6.....	104
5.6.2 Frequência de destacamento de gota no arame tubular E71T-1C.....	105
5.6.3 Análise estatística dos resultados.....	106
6. CONCLUSÕES.....	107
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	109
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Dada a competitividade mundial atual e às facilidades com que se compram produtos em qualquer parte do planeta, o desenvolvimento tecnológico se torna estratégico para as empresas. É uma questão de sobrevivência desenvolver equipamentos que atendam a novos padrões, mais seguros, menos agressivos ao meio ambiente e à saúde das pessoas, com menor custo, com menor tempo de fabricação, maiores ganhos em produtividade e qualidade e ainda com maior agilidade no fornecimento de serviços. Estes são os novos desafios ou, se quisermos olhar por outro ângulo, este cenário é o conjunto potencial de fatores em que consistem as novas oportunidades para o crescimento das indústrias de equipamentos e de soldagem.

Em nosso dia a dia já podemos observar que, cada vez mais, os produtos importados incomodam os produtores nacionais que não se prepararam para este momento da história da indústria brasileira.

Ainda que este seja um caminho compulsório, é muito comum vermos em alguns segmentos de indústrias, aquelas que compram suas matérias primas com base exclusivamente no baixo custo [01]. Com as indústrias de componentes soldados não é diferente. Da menor à maior, da indústria de utilidades domésticas e automóveis, passando pelos implementos rodoviários à construção pesada, estruturas metálicas, ferroviária e naval. Em geral, a preocupação com o custo está presente em todos os segmentos.

Avaliando os processos de soldagem, o processo MIG-MAG, quando é escolhido por ser semi-automático, já identifica as indústrias que buscam por maior produtividade, onde os postos de trabalho são fixos, com alta repetibilidade nas peças soldadas (soldagem seriada). Geralmente o que conta neste ambiente é a velocidade com que as peças são produzidas, desde que com a qualidade desejada. Com tanta necessidade de produção de peças soldadas em grandes volumes, as indústrias desenvolveram diversos mecanismos de monitoramento para detecção de falhas, de alterações nos parâmetros de soldagem, que funcionam como dispositivos poka yoke ou Jidoka, ferramentas de qualidade para evitar defeitos no ciclo de produção.

Buscando por consumíveis que também contribuam com a alta produtividade, por parte dos consumidores existem sempre muitas cobranças de bom desempenho do arame eletrodo ou que, pelo menos, não provoque paradas na produção por interrupção na alimentação.

Engenheiros de soldagem por sua vez, buscam continuamente idéias para melhorarem seus processos e aumentarem as velocidades de avanço dos cordões de solda e produzirem cada vez mais, aumentando as bitolas de arames, substituindo o gás de proteção, os consumíveis, os equipamentos de soldagem por processos cada vez mais controlados.

Para a correta escolha dos consumíveis, existem ainda muitas dúvidas sobre o verdadeiro desempenho de cada um, pois cada qual tem a sua aplicação, onde poderia obter o seu melhor rendimento e também devido às dificuldades de se manter vários tipos de consumíveis à disposição para as diversas aplicações, posições de soldagem, acabamentos e propriedades mecânicas do metal

depositado desejados. Por este motivo os engenheiros de soldagem sentem-se confusos na escolha do melhor consumível, seja com base na **taxa de deposição**, o que daria uma maior velocidade na soldagem, seja com base na **eficiência de deposição**, o que daria um melhor aproveitamento do consumível sem desperdícios.

O presente trabalho não teve o objetivo de comparar e/ou destacar produtos de diferentes fabricantes, mas sim comparar dois consumíveis competitivos em suas aplicações no que diz respeito ao quesito PRODUTIVIDADE. Um deles é o arame eletrodo AWS A5.18 ER70S-6, um arame sólido muito usado neste tipo de indústria citado acima. O outro, o arame AWS A5.20 E71T-1C, um arame tubular cujas aplicações são as mesmas do arame sólido citado. Neste trabalho, foi tratado apenas da soldagem de aços de baixo teor de carbono, onde ambos os arames podem ser amplamente aplicados.

Alguns outros fatores que podem interferir na produtividade durante a soldagem e, portanto na escolha destes dois tipos de consumíveis, são os fumos e gases gerados por cada um e os investimentos necessários para minimizar os seus efeitos para os soldadores.

Para a realização deste trabalho foram estudadas as aplicações dos dois tipos de arame em situações muito comuns na indústria, com fontes de energia convencionais, usando baixo aporte de calor, tocha seca, transferência por curto circuito (para o arame sólido) e correntes entre 120 e 250 Amperes.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR

2.1.1 FUNDAMENTOS DO PROCESSO

A Soldagem a Arco com Arame Tubular (Flux-Cored Arc Welding – FCAW) é um processo de soldagem por fusão, com um arame eletrodo tubular sendo alimentado de forma contínua e o arco elétrico ocorrendo entre o eletrodo e a peça. Dentro do arame tubular existe um fluxo que se funde juntamente com o arame durante a soldagem. É um processo muito semelhante ao GMAW em seus princípios de funcionamento, equipamentos e também pelo alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição, alto rendimento, resultando em alta produtividade. Também se pode dizer que é um processo que se assemelha muito ao SMAW e SAW, com a possibilidade de incluir no metal depositado, elementos de liga pelo fluxo [02].

Existem duas versões para este processo, uma com gás de proteção suplementar vindo de uma fonte externa (FCAW-G) e a outra sem o gás de proteção (FCAW-S). O arame para o processo FCAW-G é conhecido como *dualshield* e nesta versão o fluxo interno fica com a função de desoxidar o metal depositado e de introduzir elementos de liga. O gás introduzido faz a função apenas de proteger o arco e ionizar a atmosfera. O arame para o processo FCAW-S, onde toda proteção necessária é feita pelo fluxo contido no eletrodo, é conhecido como autoprotégido ou *innershield*.

Nas Figuras 2.1 e 2.2 são apresentadas as representações esquemáticas do processo de soldagem com arame tubular com e sem proteção gasosa. No primeiro caso o gás de proteção é introduzido no arco através do bocal. Os gases de proteção utilizados neste processo exercem grande influência no resultado do cordão de solda. O CO₂ pode provocar um arco elétrico mais agressivo e, portanto resultar em maior penetração do cordão e mais convexo. Uma mistura de CO₂ e Argônio podem oferecer um arco mais suave e desoxidar melhor a poça de fusão, resultando em um metal depositado mais puro e de melhores propriedades mecânicas [03].

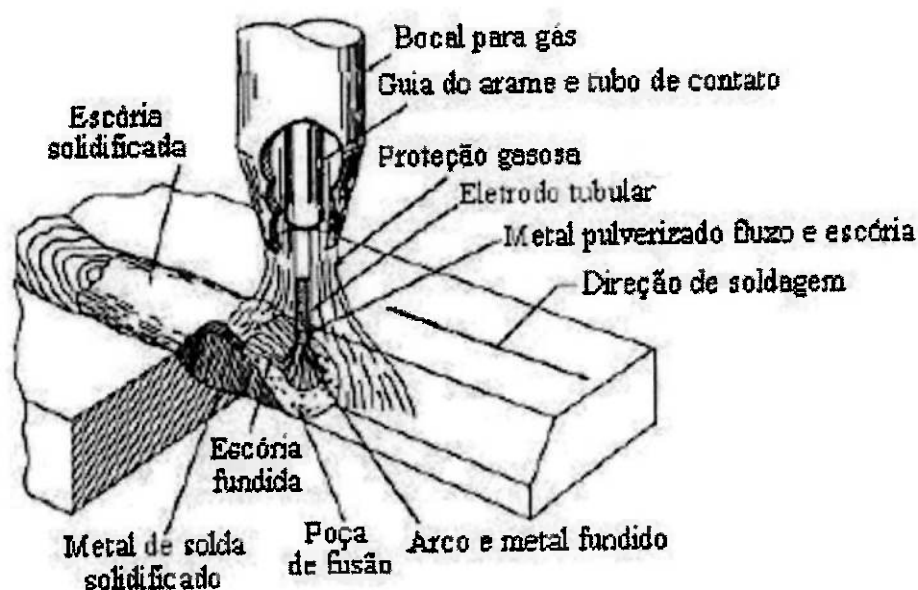


Figura 2.1 - Soldagem com proteção gasosa [04]

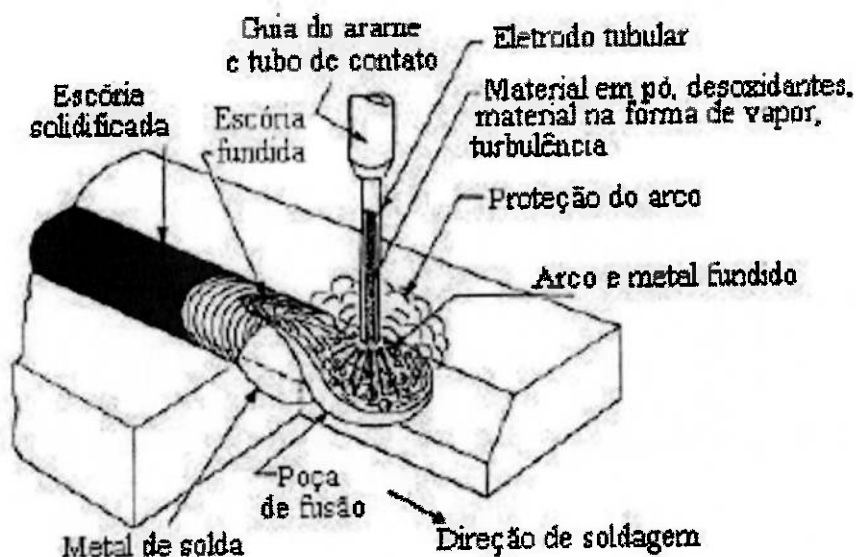


Figura 2.2 - Soldagem sem gás de proteção [04]

Dentro da versão com gás deste arame, existe ainda o arame tubular com fluxo metálico (metal cored) e com fluxo não metálico (flux cored), que podem ainda ser de natureza rutilico ou básico.

2.1.2 CONSUMÍVEIS

2.1.2.1 CLASSIFICAÇÃO

Os arames tubulares usados para a soldagem de aços carbono são classificados pela norma americana AWS, segundo a especificação AWS A5.20 que se baseia nos tipos de corrente, posições recomendadas, propriedades mecânicas do metal depositado, uso ou não de proteção gasosa e aplicabilidade quanto à soldagem mono ou multi passes, para um dado arame.

O formato de classificação é dado pelo seguinte sistema:

E XXT – X X, sendo:

E (primeiro dígito) indica um eletrodo para a soldagem a arco;

X (segundo dígito) indica o limite de ruptura no ensaio de tração do metal depositado (x10 Ksi);

X (terceiro dígito) indica as posições de soldagem recomendadas, sendo **0** indicado para as posições plana e horizontal ou **1** indicado para todas as posições;

T (quarto dígito) indica se tratar de um arame tubular com núcleo fluxado;

X (quinto dígito) Indica a usabilidade do eletrodo e a polaridade (representados na tabela 2.1, abaixo). Números de **1** a **14** indicam a usabilidade do eletrodo; **G** indica que a polaridade e as características gerais do eletrodo não são especificadas, e **S** (caso seja usado), indica que o eletrodo é apropriado apenas para passe único;

X (sexto dígito) Indica o gás de proteção a ser usado. A letra **C** indica que o arame está classificado para uso com o gás CO₂ 100% puro. A letra **M** indica uso do arame com mistura de Argônio/CO₂ (entre 75 e 80% de Argônio). Se nenhuma letra aparece aqui indica que, ou o gás de proteção utilizado para a classificação é o CO₂ ou o eletrodo é autoprotégido e não necessita de gás de proteção suplementar.

TABELA 2.1 – Significados do quinto dígito – Usabilidade do eletrodo tubular quanto à polaridade, gás de proteção e técnica operatória.

Usabilidade	Classificação AWS	Posição de Soldagem	Gás de Proteção	Polaridade	Aplicação
1	E70T-1	PP e PH	CO2	DCEP	Passes Múltiplos ou Simples
	E70T-1M	PP e PH	Ar/CO2 (75 a 80%)		
	E71T-1	PP, PH, VA, SC	CO2		
	E71T-1M	PP, PH, VA, SC	Ar/CO2 (75 a 80%)		
2	E70T-2C	PP e PH	CO2	DCEP	Passes Simples
	E70T-2M	PP e PH	Ar/CO2 (75 a 80%)		
	E71T-2C	PP, PH, VA, SC	CO2		
	E71T-2M	PP, PH, VA, SC	Ar/CO2 (75 a 80%)		
3	E70T-3	PP e PH	-	DCEP	Passe Simples
4	E70T-4	PP e PH	-	DCEP	Passe Simples ou Múltiplo
5	E70T-5C	PP e PH	CO2	DCEP	Passes Simples
	E70T-5M	PP e PH	Ar/CO2 (75 a 80%)	DCEP ou DCEN	
	E71T-5C	PP, PH, VA, SC	CO2		
	E71T-5M	PP, PH, VA, SC	Ar/CO2 (75 a 80%)		
6	E70T-6	PP e PH	-		DCEP
7	E70T-7	PP e PH	-	DCEN	Passe Simples ou Múltiplo
	E71T-7	PP, PH, VA, SC	-		
8	E70T-8	PP e PH	-	DCEN	Passe Simples ou Múltiplo
	E71T-8	PP, PH, VA, SC	-		
9	E70T-9C	PP e PH	CO2	DCEP	Passe Simples ou Múltiplo
	E70T-9M	PP e PH	Ar/CO2 (75 a 80%)		
	E71T-9C	PP, PH, VA, SC	CO2		
	E71T-9M	PP, PH, VA, SC	Ar/CO2 (75 a 80%)		
10	E70T-10	PP e PH	-	DCEN	Passe Simples
11	E70T-11	PP e PH	-	DCEN	Passe Simples ou Múltiplo
	E71T-11	PP, PH, VA, SC	-		
12	E70T-12C	PP e PH	CO2	DCEP	Passe Simples ou Múltiplo
	E70T-12M	PP e PH	Ar/CO2 (75 a 80%)		
	E71T-12C	PP, PH, VA, SC	CO2		
	E71T-12M	PP, PH, VA, SC	Ar/CO2 (75 a 80%)		
13	E61T-13	PP, PH, VA, SC	-	DCEN	Passe Simples
	E71T-13		-		
14	E71T-14	PP, PH, VA, SC	-	DCEN	Passe Simples
G	E60T-G	PP e PH	Não Especificado	Não Especificado	Passe Simples ou Múltiplo
	E70T-G				
	E61T-G	PP, PH, VA, SC	Não Especificado	Não Especificado	Passe Simples ou Múltiplo
	E71T-G				
	E60T-GS	PP e PH	Não Especificado	Não Especificado	Passe Simples
	E70T-GS				
	E61T-GS	PP, PH, VA, SC	Não Especificado	Não Especificado	Passe Simples
	E71T-GS				

2.1.2.2 FLUXOS E GASES DE PROTEÇÃO

Entre as principais funções do fluxo do arame, pode-se destacar a melhoria da estabilidade do arco elétrico, melhoria da transferência metálica do arame para o metal de base, a proteção da poça de fusão, e a formação da escória que atua como proteção do cordão de solda durante a sua solidificação [05].

No eletrodo tubular com proteção gasosa, pode-se utilizar um gás inerte, ativo ou uma mistura destes. Na versão sem gás (eletrodo autoprotégido), a proteção ocorre pela decomposição dos materiais inorgânicos e metálicos do fluxo, existente no interior do arame [06].

Neste experimento foi utilizado um arame rutílico (E71T-1C), cujo fluxo produz uma escória de rápida solidificação, com fluidez da poça de fusão apropriada para soldagens fora de posição e com altas taxas de deposição, pois o revestimento rutílico, juntamente com o gás de proteção utilizado, garante boa estabilidade do arco e boa transferência metálica [07]. Este arame possui ótimos recursos operacionais, com poucos respingos e fácil remoção de escória. O rutilo (óxido de titânio) permite um bom controle da viscosidade da escória favorecendo o uso deste arame em qualquer posição.

2.2. SOLDAGEM COM ARAME SÓLIDO

2.2.1 FUNDAMENTOS DO PROCESSO

O processo de soldagem GMAW (Gás Metal Arc Welding) ou também chamado de MIG-MAG, é um processo em que peças metálicas são unidas através do

seu aquecimento feito por um arco elétrico, produzido entre o arame eletrodo consumível (sem revestimento interno ou externo) e a peça. Um gás de proteção é utilizado para fazer a proteção da região do arco e da poça de fusão, contra a ação contaminante da atmosfera. O gás ou mistura de gases, normalmente utilizados, podem ser inertes ou ativos. Quando a proteção gasosa é inerte ou feita por gases inertes, o processo é chamado de MIG (Metal Inert Gas). Quando o gás usado é ativo ou contém misturas ricas em gases ativos, o processo é chamado de MAG [08].

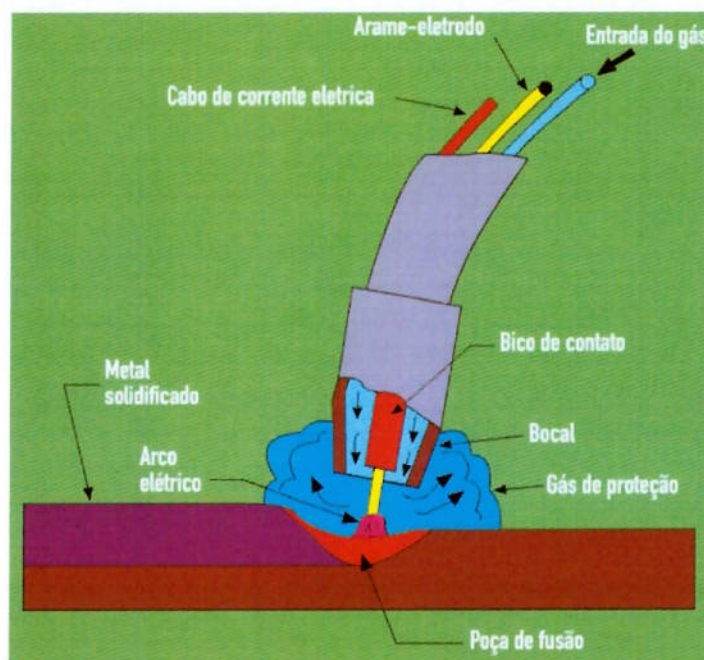


Figura 2.3 – Representação esquemática do processo MIG-MAG.

Em geral o processo GMAW (MIG-MAG) é semiautomático, tendo a sua alimentação de arame feita através de um alimentador motorizado. O soldador deste processo fica responsável por iniciar e finalizar o arco, além de percorrer a junta imprimindo a velocidade de avanço da soldagem [08].

O processo MAG é utilizado apenas para a soldagem de metais ferrosos, usando-se o gás CO₂, misturas de Ar+CO₂, Ar+O₂ ou Ar+CO₂+O₂. O processo MIG pode ser usado para a soldagem de metais ferrosos e de não ferrosos [08].

O processo de soldagem MIG-MAG é amplamente utilizado na fabricação e manutenção de peças metálicas, na recuperação de peças desgastadas e no revestimento de superfícies metálicas com arames especiais.

Em relação a outros processos de soldagem o processo MIG-MAG tem inúmeras vantagens, como quando comparado ao eletrodo revestido, pois podemos dizer que possui maior taxa de deposição, maior eficiência de deposição, mais alto fator de ocupação do soldador, não existência de revestimento e, portanto sem necessidade de remoção de escória e limpeza após cada cordão e exigência de menor habilidade do soldador. Sua principal limitação encontra-se em sua maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos do arco de soldagem, influenciando diretamente a qualidade do cordão de solda. Além disso, este processo tem maior custo dos equipamentos e menor variedade de consumíveis [08].

Nos últimos anos a soldagem com o processo MIG-MAG (GMAW) e a soldagem com arames tubulares (FCAW), têm sido as que mais cresceram em utilização, em escala mundial. Isso tem ocorrido devido à necessidade de aumento da produtividade das indústrias, à busca de processos mais rápidos e à tendência de substituir os processos de soldagem manuais por processos semi-automáticos e mecanizados [08]. Entre os processos que melhor atendem a

estas exigências estão os processos MIG-MAG e o Arame Tubular, devido às facilidades em automatizar a soldagem com estes processos.

2.2.2 CONSUMÍVEIS

Os arames para a soldagem por este processo são rigorosamente controlados em suas dimensões, composição química, propriedades mecânicas e acabamento superficial.

2.2.2.1 CLASSIFICAÇÃO

Os arames sólidos usados para a soldagem de aços carbono são classificados pela norma americana AWS, segundo a especificação AWS A5.18 que engloba os arames sólidos e também os arames com fluxo metálico.

O formato de classificação é dado pelo seguinte sistema:

ER XXXS – YYY ZZ, sendo:

ER - Indicam eletrodo para a soldagem (E) a arco e/ou vareta (R)

XXX - Indicam o limite de resistência mínimo do metal depositado em KSI.

S - Indica: "**S**" para arame sólido (maciço) ou "**C**" para arame tubular com enchimento metálico.

YYY - Indicam requisitos de composição química do eletrodo ou do metal depositado (conforme tab.XX)

ZZ - Indicam opcionalmente o teor de hidrogênio difusível (ml/100g de metal depositado). Pode ser 2, 4, 8 ou 16.

Tabela 2.2 – Requisitos de composição química para o arame ou metal de solda (% peso).

Classificação	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
ER70S-2	0,07	0,9-1,4	0,40-0,70	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,50
ER70S-3	0,06-0,15	0,9-1,4	0,45-0,75							
ER70S-4	0,06-0,15	1,0-1,5	0,65-0,85							
ER70S-6	0,06-0,15	1,4-1,8	0,80-1,15							
E70S-7	0,06-0,15	1,5-2,0	0,50-0,80							
E70S-G	Não Especificado									

Tabela simplificada. Adaptada da TABELA 1 da Especificação AWS A5.18

2.2.2.2 GASES DE PROTEÇÃO

Na soldagem MIG-MAG os gases podem ser inertes, ativos ou mistura destes. O gás de proteção na soldagem pode influenciar nas características do arco, no tipo de transferência metálica, na penetração, na geometria e no acabamento superficial do cordão, na velocidade de soldagem, nas discontinuidades como mordeduras e outras e ainda no custo total da operação de soldagem [08].

Os gases de proteção a serem utilizados são definidos conforme o processo (MIG ou MAG), o material a ser soldado (ferroso ou não ferroso), os resultados desejados (penetração, acabamento e custo). Quanto às propriedades químicas e mecânicas, em geral a norma AWS define o gás utilizado para cada tipo de consumível para a obtenção dos resultados mínimos desejáveis.

Para o processo MIG (Metal Inert Gás) usa-se: Ar, He ou mistura destes. A atuação do gás neste processo é de não reagir metalurgicamente com a poça de fusão nem com a gota metálica em transferência. Ele protege essa região e auxilia na formação e manutenção do arco elétrico e também melhora a molhabilidade nas ligas ferrosas.

Para o processo MAG (Metal Active Gás) usa-se: CO₂, mistura Ar+CO₂ ou Ar+CO₂+O₂. A atuação do gás neste processo é semelhante à do processo MIG, porém ele também reage metalurgicamente com a gota e com a poça de fusão [09].

Tabela 2.3 – Gases mais comuns usados na soldagem MIG-MAG:

Gás ou Mistura	Comportamento Químico	Aplicações
Argônio	Inerte	Todos os metais, exceto aço
Hélio	Inerte	Al, Mg, Cu e suas Ligas.
Ar + He (20 à 50%)	Inerte	Al, Mg, Cu e suas Ligas.
Nitrogênio	-	Cobre
Ar + N ₂ (20 a 30%)	-	Cobre
Ar + O ₂ (1 a 2%)	Ligeiramente Oxidante	Aços Inoxidáveis e algumas ligas de Cu
Ar + O ₂ (3 a 5%)	Oxidante	Aços carbono e alguns aços baixa liga
CO ₂	Oxidante	Aços carbono e alguns aços baixa liga
Ar + CO ₂ (20 a 50%)	Oxidante	Aços
Ar + CO ₂ + O ₂	Oxidante	Aços

Quanto ao percentual de cada um desses gases que se pode utilizar em cada mistura, para que seja considerada inerte ou ativa (MIG ou MAG), existe certa indefinição da fronteira exata que separa estes dois processos. Uma linha de

pensamento defende sua tese com base no efeito da mistura sobre a estabilidade do arco, no acabamento final do cordão e no custo total da soldagem. Outra linha defende sua teoria com base no efeito metalúrgico da mistura sobre o metal transferido. O correto seria que esta teoria se baseasse no nível de atividade desses gases, pois é a partir dessa atividade que o gás interfere na estrutura dos metais na soldagem e assim defini-los como MIG ou MAG [09].

Usa-se um gás ativo (O_2 , CO_2 ou ambos) em ligas ferrosas por que estes gases promovem um grande número de pontos catódicos sobre a poça de fusão, aumentam a fluidez da poça, reduzem a tensão superficial da gota e intensificam a ionização [10].

O Oxigênio (O_2) adicionado em pequenas quantidades, até 5% ao Argônio, pode melhorar a estabilidade do arco, reduzir a altura do reforço e aumentar a faixa de operação no modo spray, mas valores acima disso poderão aumentar a perda de elementos de liga no depósito de solda e gerar alguma deterioração nas propriedades mecânicas [10].

2.3. DIFERENÇAS E SEMELHANÇAS ENTRE O PROCESSO FCAW (ARAME TUBULAR) E GMAW (MIG-MAG)

2.3.1 EQUIPAMENTOS

O equipamento para a soldagem pelo processo MIG-MAG e Arame Tubular, basicamente se resume em uma fonte de energia do tipo tensão constante, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem e uma fonte de gás de proteção, além de cabos, mangueiras, regulador de pressão e de vazão de gás, conforme detalhado na figura 2.4 abaixo.

O equipamento para os dois processos pode ser o mesmo, substituindo-se apenas as roldanas, conforme figura 2.6. No caso do arame auto-protegido exige também a mudança na pistola, conforme figura 2.2.

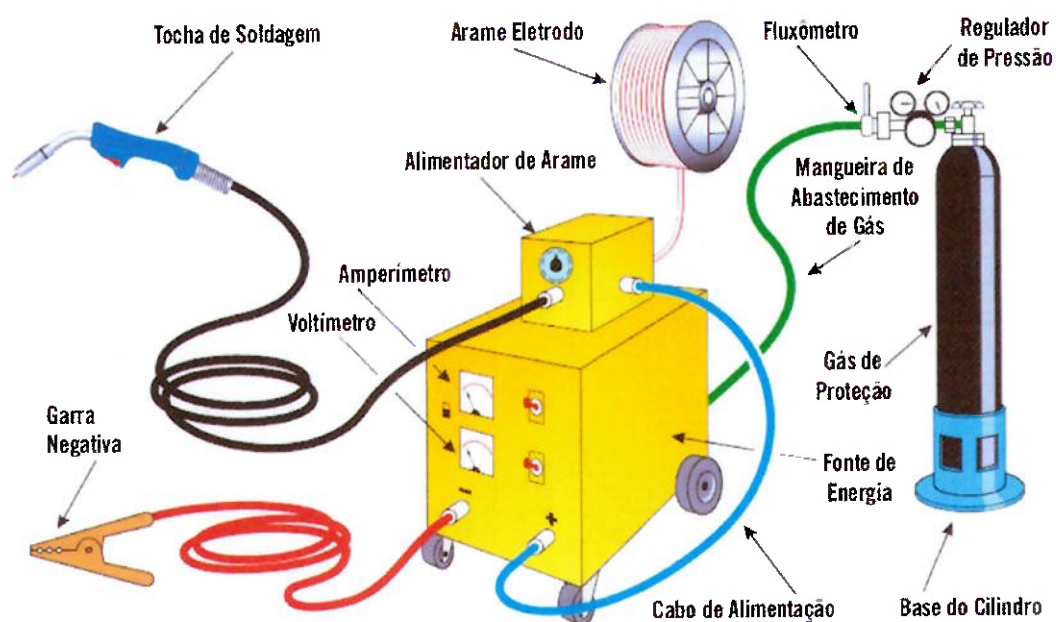


Figura 2.4 – Equipamentos básicos para a soldagem MIG-MAG e Arame Tubular (GMAW e FCAW respectivamente).

A fonte de energia de tensão constante é comumente utilizada em conjunto com um alimentador de arame. Estes dois equipamentos trabalham em conjunto para manter a velocidade de alimentação constante e permitem variações nos parâmetros de soldagem, de modo que a velocidade de consumo permaneça sempre constante e igual à velocidade de alimentação.

Este tipo de fonte de energia mantém o comprimento do arco estável. As variações no comprimento do arco são sempre acompanhadas de variações na tensão do arco e causam grandes variações na corrente de soldagem. Se ocorrer aumento do comprimento do arco, seja pela variação causada pela movimentação da mão do soldador, seja pela variação do posicionamento da tocha ou da peça na soldagem mecanizada, a corrente automaticamente sofre uma redução, provocando também queda na velocidade de consumo. Assim o comprimento do arco volta ao comprimento original [08].

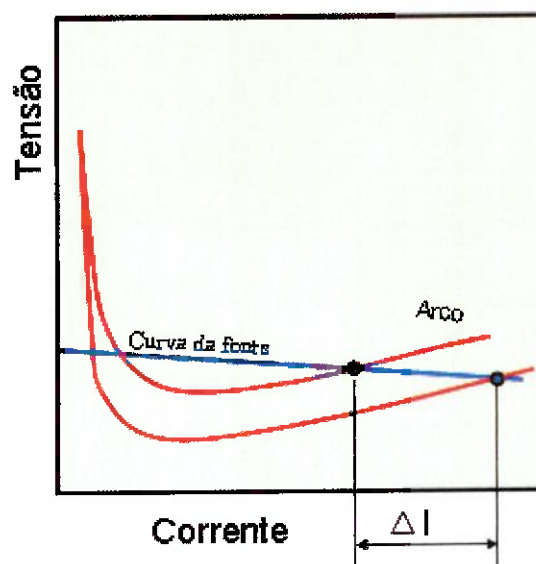


Figura 2.5 – Efeito da variação do comprimento do arco na corrente de soldagem de tensão constante [05].

Para ambos os processos (GMAW e FCAW) os equipamentos são os mesmos, com exceção do uso de uma roldana recartilhada, recomendada para uso com o arame tubular, como mostrado na figura 2.6.

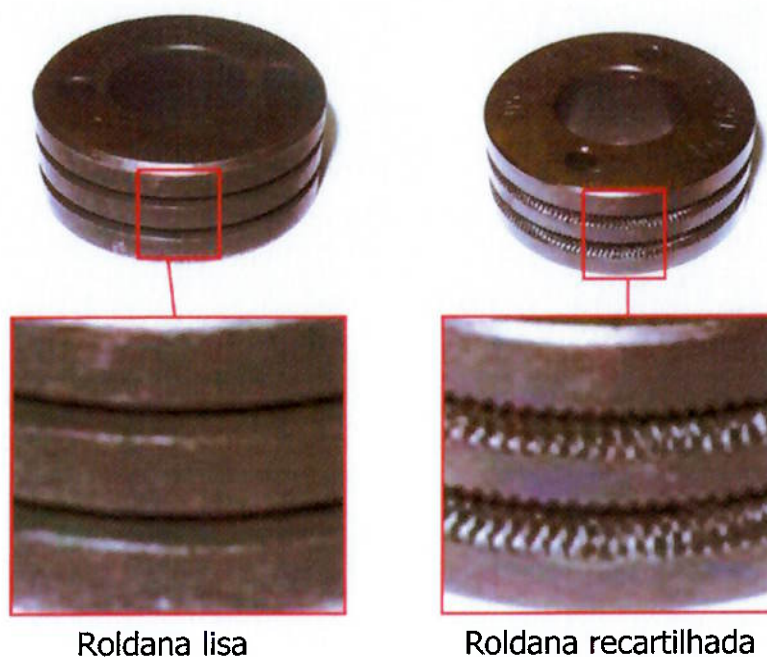


Figura 2.6 – Roldana lisa e roldana recartilhada, recomendadas para arame sólido e arame tubular respectivamente [11].

A soldagem com estes dois processos são as que mais apresentam crescimento de utilização nos últimos anos, em escala mundial. Um dos motivos da grande utilização destes processos é a tendência mundial de procura por processos semiautomáticos e mecanizados, buscando sempre a maior produtividade. Outro motivo é a grande facilidade destes processos na utilização com robôs [08].

Entre as diferenças existentes nos dois processos pode-se destacar o fato do arame tubular exigir alguns cuidados na eliminação da escória formada, principalmente em juntas multi passes, pois uma remoção de escória mal feita pode levar à inclusão de escória nos cordões subseqüentes. Outra diferença está na emissão dos gases e fumos metálicos, maior nos arames tubulares, principalmente no caso do arame tubular autoprotégido. Como vantagens dos arames tubulares em relação aos arames sólidos, pode-se destacar a possibilidade de maior produtividade.

Quanto ao modo de transferência, no processo FCAW o fluxo de gotas metálicas não ocorre de forma centralizada em relação ao eixo do arame, como no processo GMAW. Devido ao arame tubular possuir a massa metálica externamente no arame, as gotas são formadas lateralmente.

Quanto às variáveis de soldagem ambos os processos são semelhantes, pois as faixas de corrente utilizadas para cada diâmetro do arame tubular são as mesmas usadas nos arames sólidos.

Algumas características contam a favor do FCAW-G (com gás) como a possibilidade de escorificação das impurezas, adição de elementos de liga, proteção mais eficiente com menor vazão de gás, menor quantidade de respingos e cordão de melhor aspecto. As características que pesam contra este processo são formação de escória, maior geração de fumos e gases, e o custo mais elevado por peso do metal depositado.

Uma característica diferente nos arames tubulares é o uso de maior extensão do eletrodo, principalmente quando se deseja otimizar o processo para altas taxas de deposição [02]. Nos arames autoprotégidos esta extensão pode variar

entre 19 a 95 mm dependendo da aplicação. Nos arames com proteção gasosa limita-se o uso de grandes extensões de eletrodo devido à proteção do gás que pode ficar prejudicada. Recomenda-se de 19 a 38 mm [06].

Outra característica diferente no arame tubular é a taxa de deposição obtida através da maior densidade de corrente e ainda uma maior tolerância aos contaminantes presentes no metal de base. Um cordão de solda de boa aparência visual e um metal depositado de alta qualidade são também algumas das principais características do processo FCAW, além da grande versatilidade na aplicação para os mais diversos tipos e espessuras de aços existentes no mercado [04].

2.3.2 CONSUMÍVEIS

Uma das características do arame sólido é que eles têm, em sua maioria, a superfície cobreada. O arame tubular, em geral, não tem a superfície cobreada. Esta fina camada de cobre na superfície do arame sólido tem a finalidade de proteger o arame contra a oxidação, melhorar o contato elétrico com o bico de contato e facilitar o deslizamento durante a alimentação contínua do arame pelos conduítes do sistema de alimentação.

Já existem no mercado internacional arames sólidos sem a camada de cobre (copper free). Os resultados na aplicação destes arames têm mostrado que não há grandes variações na estabilidade do processo no uso dos arames cobreados e não cobreados. Apenas o desgaste dos bicos de contato têm parecido maiores [08].

Os arames sólidos destinados ao uso com CO₂ como proteção gasosa, possuem maiores teores de manganês e silício, pois isso ocorre devido à sua ação desoxidante [08].

Durante a soldagem o arame tubular apresenta maior densidade de corrente devido à área de sua seção transversal ser menor, para um mesmo diâmetro [12], vide figura 2.7. Dessa forma é maior a sua resistência elétrica, gerando mais calor durante a passagem de corrente elétrica por efeito joule, conforme as equações de 2.1 a 2.4, e conseqüentemente chegando a taxas de fusão 30 a 35 % maiores que as obtidas com arame sólido [13]. Por esse motivo os parâmetros usados na soldagem de cada um dos dois tipos de arames devem ser adequados para cada modo de transferência e assim obter a melhor qualidade de cada um [12].

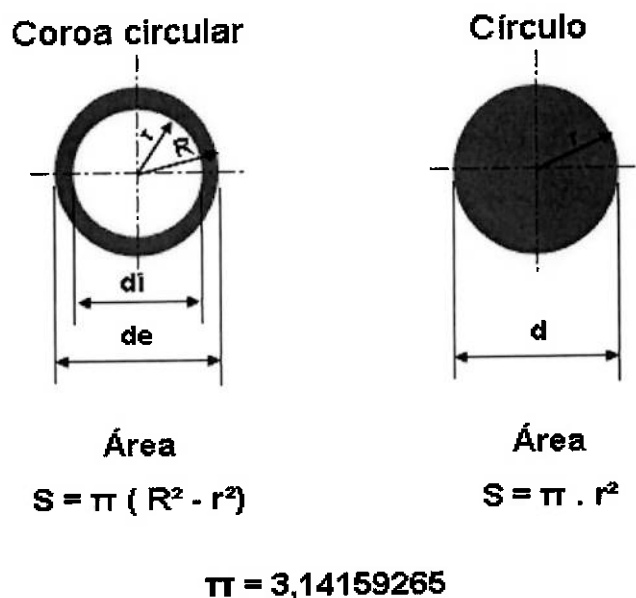


Figura 2.7 - Comparação das seções transversais dos dois arames

$$Q_t = R_e . I^2 . t \quad (2.1)$$

Onde: Resistência é dada por:

$$R_e = \frac{\rho . L}{A} \quad (2.2)$$

Para arame sólido a equação 2.2 torna-se:

$$R_e = \frac{\rho . L}{\pi . d^2 / 4} \quad (2.3)$$

Para arame tubular a equação 2.2 torna-se:

$$R_e = \frac{\rho . L}{\pi . (d_e - d_i)^2 / 4} \quad (2.4)$$

Onde:

Q_t = calor transferido por efeito joule (J)

I = corrente média (A)

t = tempo (s)

R_e = resistência (Ω)

ρ = resistividade elétrica do material (Ωmm)

L = comprimento do eletrodo (mm)

d = diâmetro do arame sólido (mm)

d_e = diâmetro externo (mm)

d_i = diâmetro interno (mm)

2.3.3 GEOMETRIA DO CORDÃO

A diferença entre a geometria do cordão na soldagem com arame tubular e arame maciço (MIG-MAG) se dá devido ao comportamento do arco e da transferência das gotas de metal fundido para a poça de fusão, formando uma penetração profunda e estreita do tipo dediforme (finger) para o arame maciço e uma penetração rasa, porém mais larga, conforme mostrado na figura 2.8 [04] e 2.9.

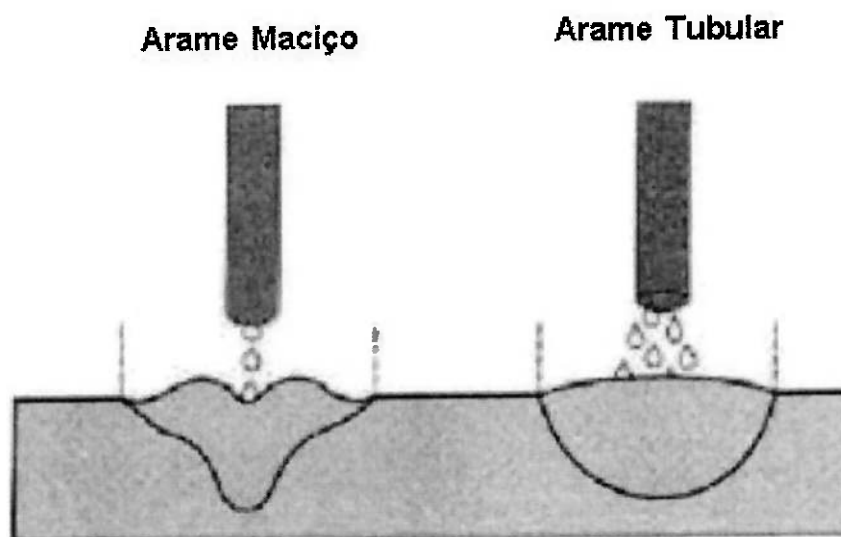


Figura 2.8 – Geometria do cordão de solda. Formação do finger no arame maciço e cordão mais largo e raso no arame tubular [04].

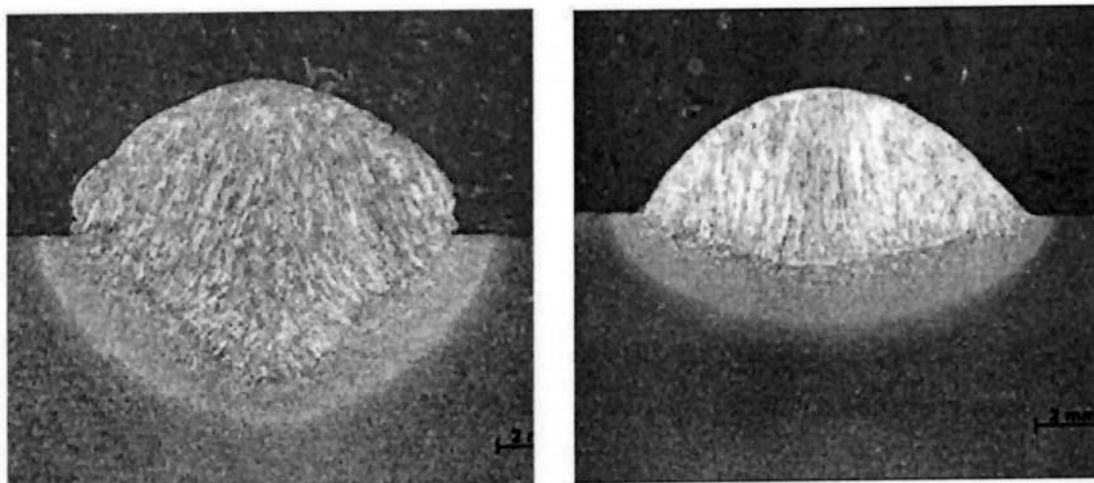


Figura 2.9- Foto de seção transversal das soldas com o arame sólido (maciço) e tubular.

2.3.4 TAXA DE DEPOSIÇÃO

A taxa de deposição é um dos fatores mais importantes na soldagem com eletrodos tubulares, pois está relacionada diretamente com o custo do processo.

Na soldagem com os arames tubulares (FCAW) a corrente é conduzida pelo tubo metálico que envolve o núcleo fluxado. Já nos arames sólidos, a corrente é conduzida por toda seção transversal.

Uma experiência feita por WIDGERY, em 1994 na Inglaterra, demonstrou as altas taxas de deposição alcançadas pelo arame tubular rutílico E71T-1C (FCAW), pelo arame tubular com núcleo metálico (GMAW) e pelo arame sólido (GMAW), todos com diâmetro de 1,2 mm, como mostra a figura 2.10. À medida que se aumenta a corrente, em fontes de energia convencional, as taxas de deposição aumentam, incluindo o arame com núcleo metálico. As

menores taxas de deposição foram obtidas, por este autor, com o arame sólido [14].

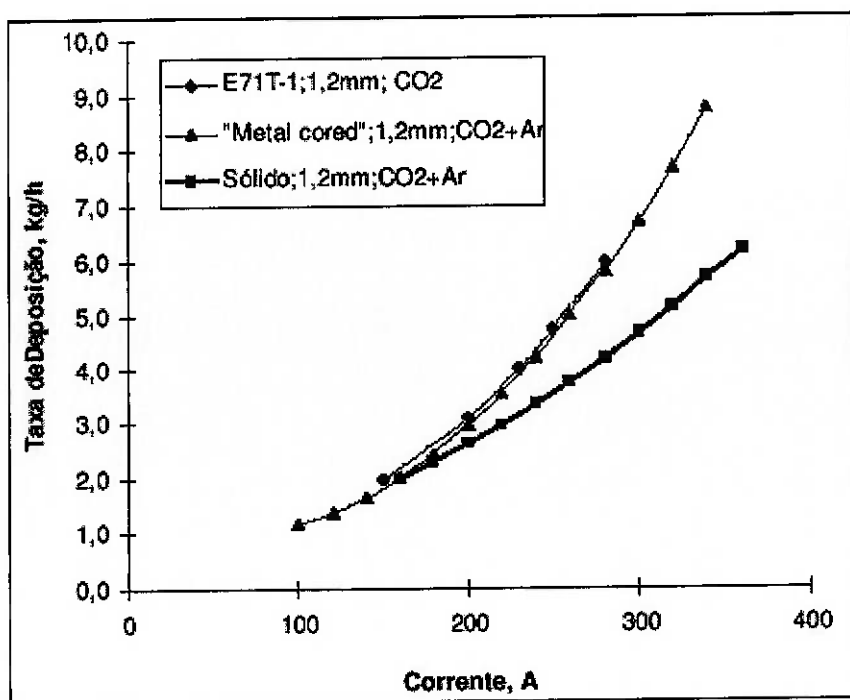


Figura 2.10 – Taxa de deposição de arames sólidos e tubulares [14].

A distância bico de contato peça (DBCP) é um parâmetro importante como pode ser visto na figura 2.11, o gráfico 'a' mostra valores adequados de tensão, corrente e DBCP, o que nos dá uma potência disponível ($V1I1 + R1I1^2$) para fundir o arame eletrodo. Se aumentarmos a DBCP, aumentará também a tensão (gráfico "b"), assim, a energia passará para $V'I' + (R2I')^2$, ou seja, a corrente diminuirá, conseqüentemente a energia de soldagem e a velocidade de fusão também diminuirão. [15].

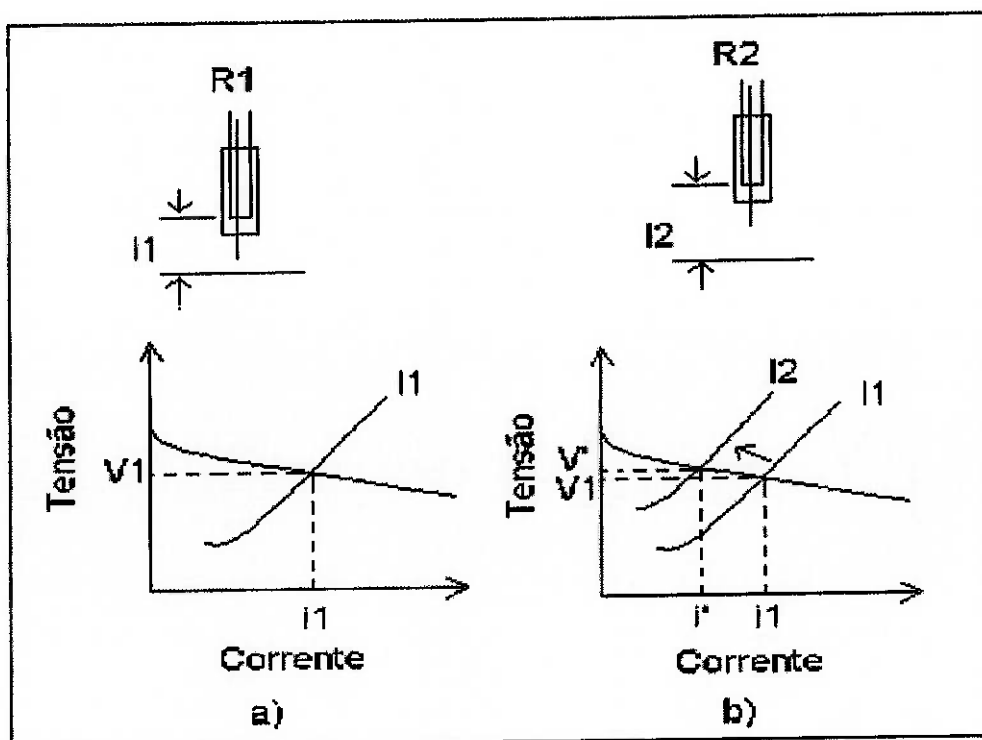


Figura 2.11 – Influência da DBCP na corrente de soldagem [15].

Quando a DBCP é muito grande pode-se ter uma deficiência na ação do gás de proteção. Para uma taxa de alimentação de arame fixa, qualquer aumento na DBCP tem o efeito de reduzir a corrente fornecida pela fonte. Se a velocidade de alimentação do arame for aumentada para compensar a queda de corrente resultará em um aumento significativo na taxa de deposição do metal de solda [15]. A figura 2.12 mostra o efeito da DBCP na corrente e na taxa de deposição.

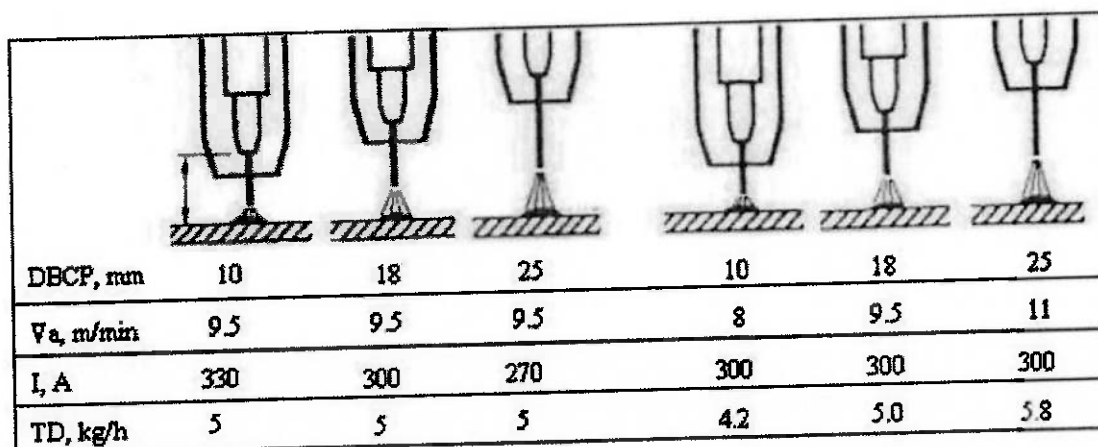


Figura 2.12 – Efeito da DBCP na corrente e na taxa de deposição [15].

2.3.5 TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Transferência metálica é o modo pelo qual o metal líquido é transportado da ponta do arame eletrodo para a poça de fusão. O conhecimento das suas características e o bom entendimento de como ocorrem os modos de transferência são fundamentais para o domínio, controle e adequação da soldagem MIG-MAG em suas diversas aplicações [16].

Os modos de transferência metálica conhecidos atualmente foram modelados há algumas décadas e são citados por diversos autores. Eles se baseiam no conceito natural de transferência de metal, produzido pelas fontes de energia convencionais da época.

O modo como a gota de metal se transfere em uma determinada condição de soldagem depende da combinação de alguns fatores como o tipo de gás de proteção e vazão; o tipo e a intensidade de corrente elétrica (CC, CA ou pulsada); a polaridade utilizada no eletrodo; o diâmetro e composição química do eletrodo; a DBCP; a tensão de soldagem e a pressão ambiente [17].

Os diagramas de modos de transferência já conhecidos, que se baseiam na relação existente entre a corrente de soldagem e a tensão do arco (fig. 2.13), fornecem subsídios para os especialistas na escolha de parâmetros de soldagem e condições adequadas de operação.

Basicamente existem três modos de transferência metálica mais facilmente detectados e amplamente aceitos, chamado Fundamental ou "Natural" [18-19], no qual a gota de metal fundido, formada na ponta do arame, é eletronicamente transferida à poça de fusão. São eles: curto-circuito, globular e spray.

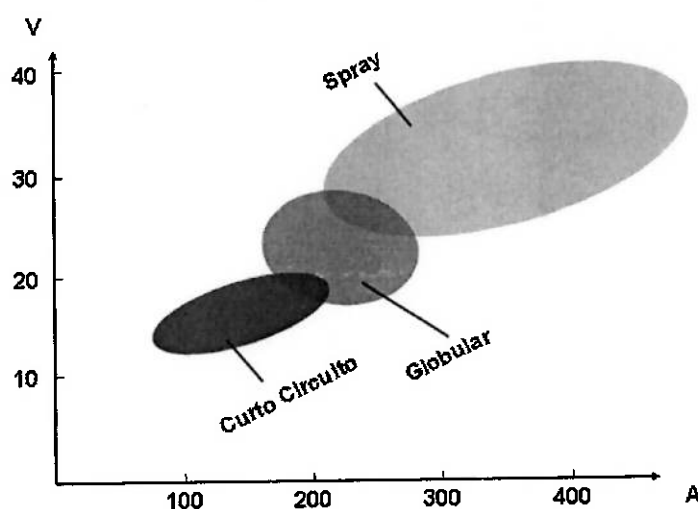


Figura 2.13 – Modos de transferência de metal e a sua relação com a corrente e a tensão da soldagem [18].

Como a tecnologia das fontes de alimentação tem avançado e os processos de soldagem MIG-MAG têm se desenvolvido, foram identificados outros novos modos de transferência, em especial os que projetam as gotículas de metal através do arco. Um exemplo disso é o processo de corrente pulsada que foi desenvolvido para transferir a gota de metal em uma média de corrente de

soldagem baixa. O pulso de corrente alta é usado para fundir a gota de metal e separá-la da ponta do arame fig. 2.14 [18].

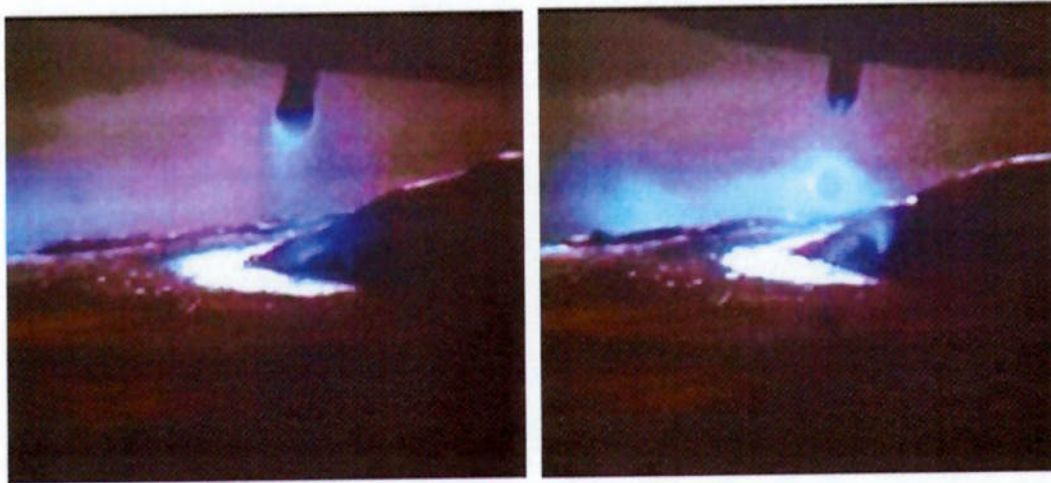


Figura 2.14 - Transferência Pulsada: A gota de metal é transferida durante o período de corrente de base baixa [18].

Os outros modos de transferência definidos, aceitos pelo IIW, podem ser mostrados de forma mais completa na tabela 2.4. Eles podem ser considerados como uma subdivisão dos outros modos de transferência mencionados acima. Alguns desses modos são obtidos por formas especiais de operação do equipamento.

O Instituto internacional de Soldagem (IIW) classifica a transferência metálica na soldagem a arco em três grupos: transferência por "vôo livre", transferência por contato e transferência guiada pela escória [20].

Na transferência por "vôo livre" a gota metálica atinge a poça de fusão passando através do arco, sem nenhum contato elétrico ou mecânico.

Na transferência por contato ocorre o toque entre a extremidade do metal de adição fundido e a poça de fusão.

A transferência guiada pela escória ocorre nos processos que utilizam fluxo granulado, pois as gotas aderem ao fluxo fundido e são guiadas por ele.

A figura 2.15 ilustra os modos de transferência mostrados na tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Classificação dos modos de transferência aceitos pelo IIW [18].

Designação do modo de transferência	Exemplos de processos de soldagem
1- TRANSFERÊNCIA POR VÔO LIVRE	
1.1 – Transferência Globular	
<i>1.1.1 Transferência por gotas</i>	GMAW de baixa corrente
<i>1.1.2 Transferência por repulsão</i>	GMAW com CO ₂ (gás de proteção)
1.2 – Transferência por Spray	
<i>1.2.1 Spray projetado</i>	GMAW - corrente intermediária
<i>1.2.2 Spray com alongamento</i>	GMAW – média corrente
<i>1.2.3 Spray rotacional</i>	GMAW – alta corrente
1.3 – Transferência por explosão	SMAW (eletrodo revestido)
2. TRANSFERÊNCIA POR CONTATO	
2.1 – Transf. Por curto-circuito	GMAW - curto circuito
2.2 – Transferência continua	Soldagem com adição de metal
3. TRANSF. PROTEGIDA POR ESCÓRIA	Transferência pela escória protegida
3.1 – Transf. guiada pela parede	SAW
3.2 – Outros modos	SMAW, FCAW, ESW

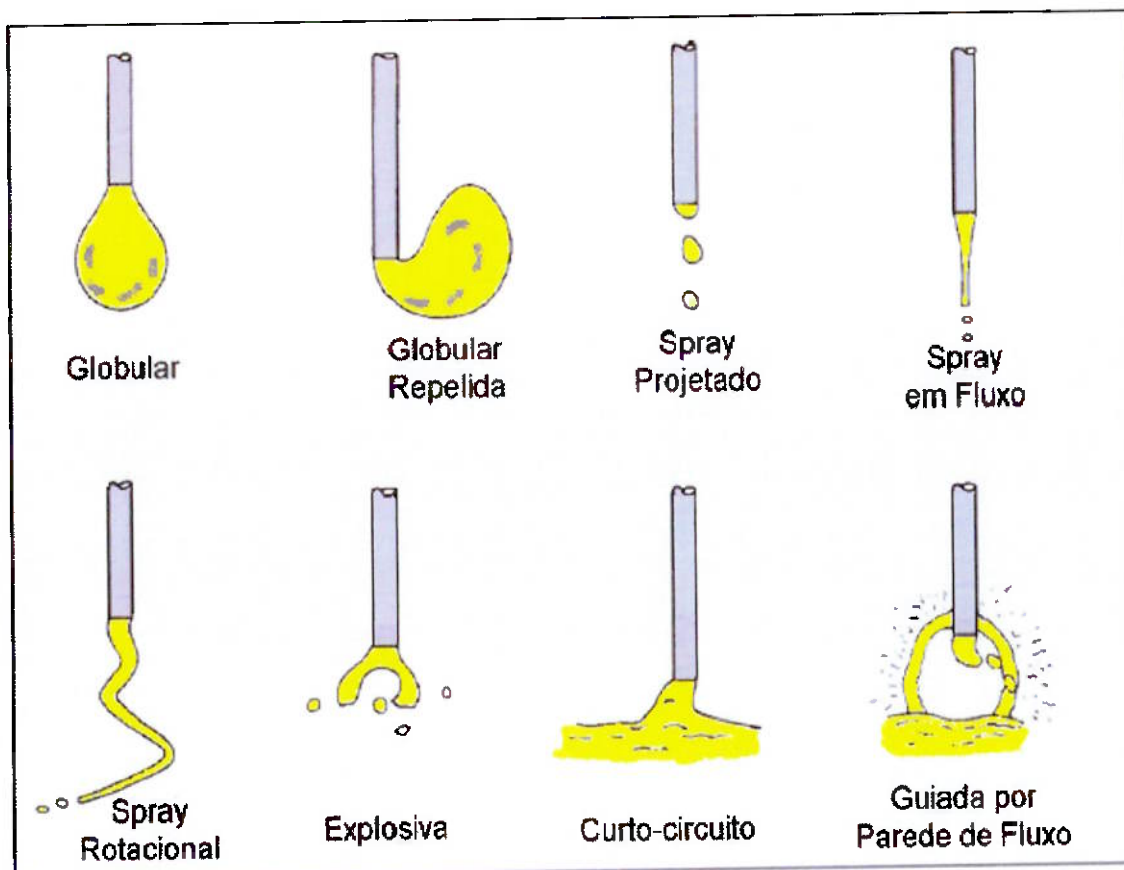


Figura 2.15 - Modos de transferência conforme classificação do IIW [19].

Iordachescu e Quintino [21] propuseram a nova classificação dos modos de transferência metálica que pode ser observada na Figura 2.16. Além das definições dos modos de transferência metálica, os autores apresentaram também as duas regiões caracterizadas por correntes de transição.

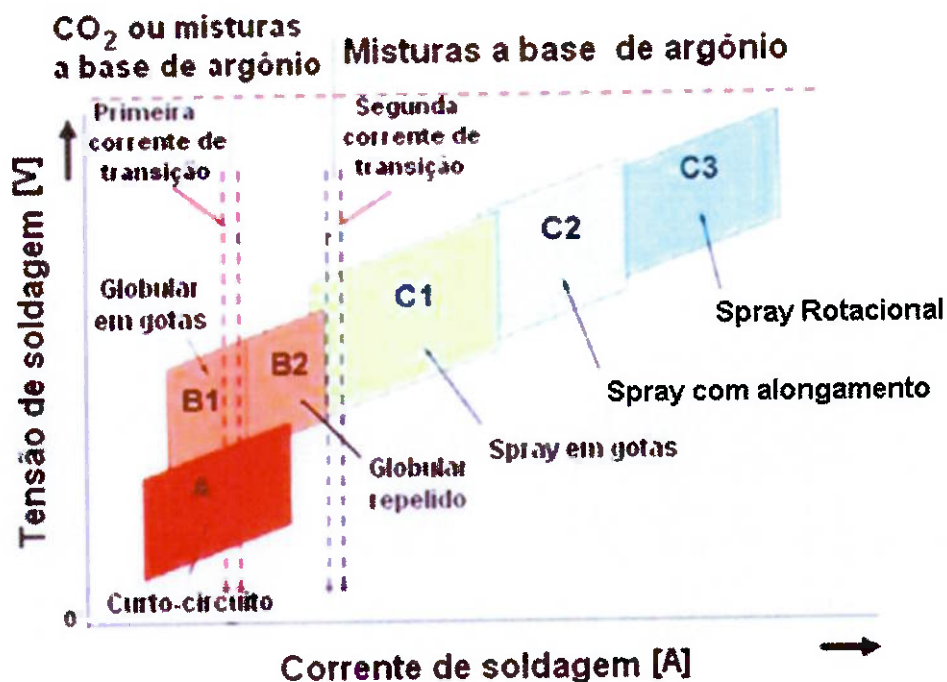


Figura 2.16 - Proposta de classificação dos modos de transferência [21].

2.3.5.1 TRANSFERÊNCIA POR VÔO LIVRE (1-tabela 2.4)

2.3.5.1.a – Transferência Globular (1.1-tabela 2.4)

Este tipo de transferência geralmente ocorre para qualquer tipo de gás de proteção, em baixas densidades de corrente, porém em tensão de soldagem mais elevada, o que garante o comprimento de arco maior e evita o curto circuito.

A frequência de destacamento de gotas é baixa, cerca de 1 a 100 gotas/s [21-22-23-24-25]. Para misturas ricas em CO₂ e hélio, este modo de transferência pode ser atingido em uma faixa de corrente mais ampla.

O diâmetro da gota é maior do que o diâmetro do arame eletrodo, cerca de 1,3 a 2 vezes maior, como podemos notar na figura 2.17. Com o aumento da corrente a gota tende a diminuir o seu tamanho e esta grande gota pode ser repelida devido às forças eletromagnéticas [18].

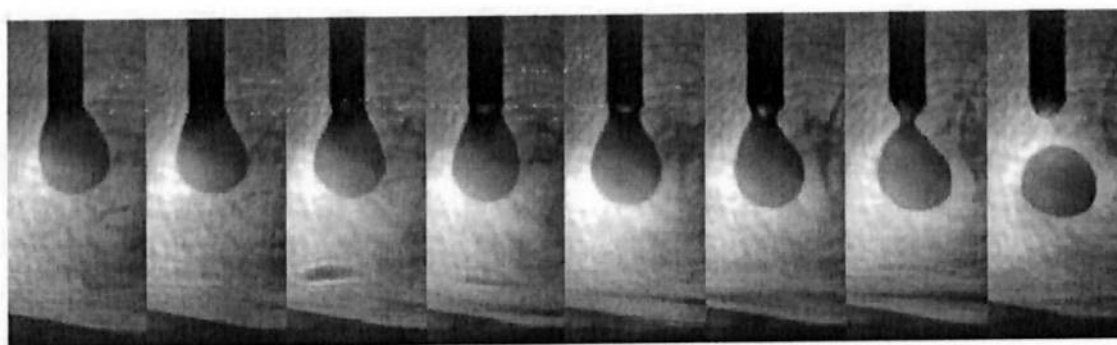


Figura 2.17 – Imagens de uma filmagem de alta velocidade de transferência metálica globular [17].

Na transferência globular a gota de metal líquido se mantém presa na ponta do arame eletrodo por ação da tensão superficial.

Com o grande volume da gota o seu peso se eleva e ela se separa do arame por ação das forças magnéticas e de arraste do plasma, sendo transferida para a poça de fusão [26-27]. Esta forma de transferência depende da gravidade, portanto a sua aplicação fora da posição plana deve ser evitada [21-28-29].

O nível de respingos na transferência globular é relativamente elevado e o aporte de calor é intermediário, comparado a outros modos de transferência.

Por utilizar baixos níveis de corrente e comprimentos de arco longos, a quantidade de energia introduzida na poça de fusão é baixa, podendo provocar não conformidades, tais como falta de fusão, falta de penetração e reforço excessivo do cordão de solda [23].

O uso da transferência globular na soldagem industrial é limitado [28], pois precisa operar com baixos valores de correntes e comprimentos de arco elevados suficientemente para garantir o destacamento da gota sem que ela toque a poça de fusão, caso contrário, poderia ocorrer um curto-circuito que superaqueceria a gota, provocando a sua explosão e conseqüentemente grande quantidade de respingos [23-30].

Com misturas ricas em argônio como gás de proteção, a transferência globular pode ser atingida com valores de corrente mais baixos e comprimentos de arco mais elevados comparativamente à soldagem de aços com misturas ricas em CO₂, onde a transferência globular ocorre com valores mais elevados de corrente [23].

As figuras 2.18 e 2.19 mostram oscilogramas de corrente e tensão de uma soldagem feita com transferência globular.

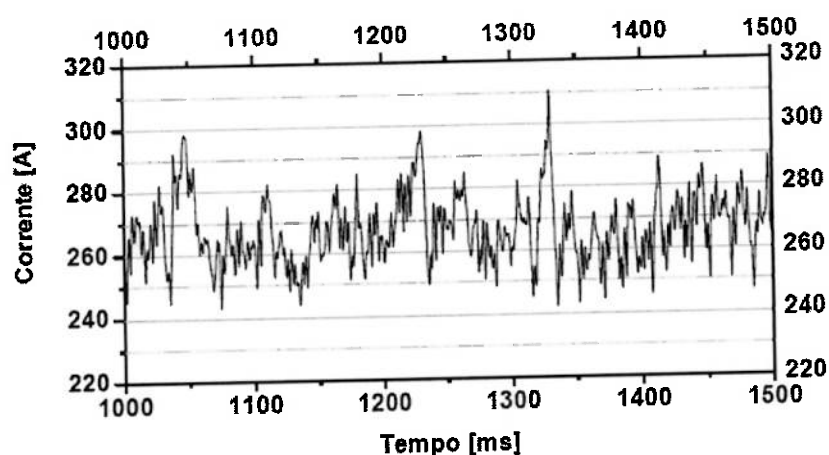


Figura 2.18 – Oscilograma de corrente na transferência globular de uma soldagem com arame AWS ER70S-6, diâmetro de 1,2 mm, gás de proteção Ar+25%CO₂ [31].

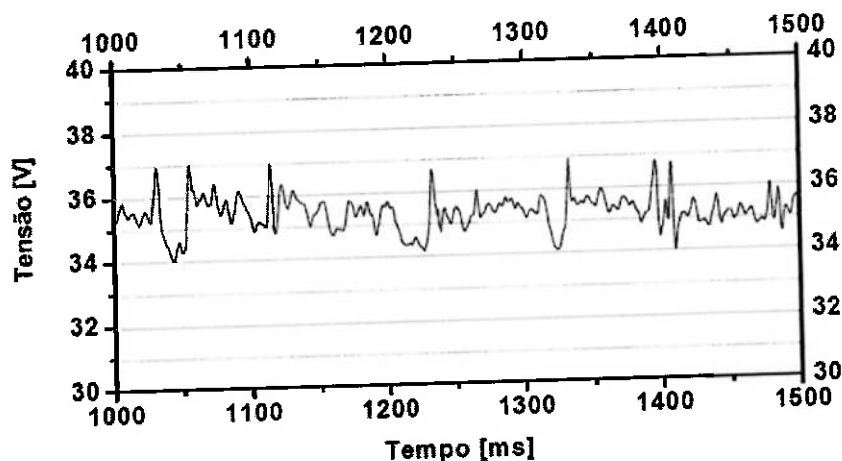


Figura 2.19 – Oscilograma de tensão na transferência globular, arame AWS ER70S-6, diâmetro de 1,2 mm, gás de proteção Ar+25%CO₂ [31].

Segundo a tabela do IIW a transferência metálica globular pode ser subdividida em outras duas formas que são transferência por gotas e transferência por repulsão.

2.3.5.1.a.1 – Transferência por Gotas (1.1.1-tabela 2.4)

A transferência por gotas é caracterizada pela ação do peso e da tensão superficial entre a gota e o metal de adição. Neste caso o diâmetro do metal de adição é muito menor que o da gota. A densidade de corrente para este modo de transferência é muito baixa [16].

2.3.5.1.a.2 – Transferência por Repulsão (1.1.2-tabela 2.4)

Neste modo de transferência a frequência de destacamento é baixa, pois a gota atinge um grande volume e só se desprende quando a força de gravidade supera a de reação. A transferência por repulsão ocorre devido a uma concentração de forças na origem do arco elétrico com a presença de CO₂

como gás de proteção, que provoca uma força de repulsão destacando e desviando a gota de sua trajetória graças à falta de simetria das forças que atuam nela [16]. A gota pode também ser defletida para fora do eixo do eletrodo ou repelida para longe da poça de fusão quando se usa eletrodo negativo. Estudos mostram que este fenômeno pode estar associado ao aparecimento de forças magnéticas ou de reações devidas à geração de vapores ou plasma na gota. Existem restrições na utilização desse tipo de transferência basicamente por estar associada a um arco instável e quantidade de respingos significativa [32]. A figura 2.20 pode nos dar uma idéia melhor ilustrada desse modo de transferência.

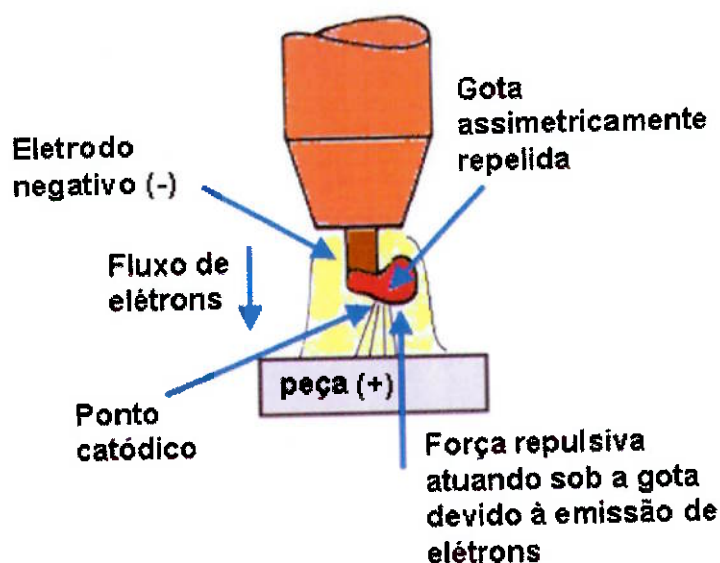


Figura 2.20 – Ilustração esquemática da transferência globular repulsiva [33-34].

2.3.5.1.b – Transferência por Spray (1.2-tabela 2.4)

Neste modo de transferência pequenas gotículas são destacadas do arame e projetadas através do arco por intensas forças eletromagnéticas, Fig. 2.21 [18].

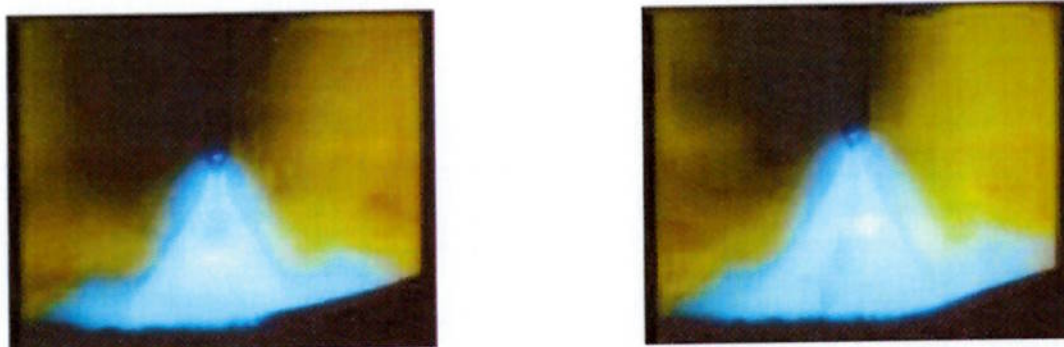


Figura 2.21 – Pequenas gotículas projetadas através do arco durante a transferência por Spray [18].

A transferência por spray ocorre em altos níveis de corrente e tensão de arco e quando se usa argônio ou misturas ricas em argônio. Com estas misturas, à medida que se aumenta a corrente durante a soldagem, o tamanho médio das gotas diminui. Aumentando-se ainda mais a corrente, a partir de certo valor, o modo de transferência passa de globular para spray. A esse nível de corrente dá-se o nome de corrente de transição globular/spray.

Durante o spray as gotas metálicas sofrem fortemente a ação das forças eletromagnéticas que diminuem o seu tamanho e a sua aceleração. Esta redução no tamanho das gotas é acompanhada do aumento do número de gotas que se separam do eletrodo. A taxa de transferência varia de pouco menos de 100 a centenas de gotas por segundo, quando a velocidade de alimentação do eletrodo aumenta de aproximadamente de 42 a 340 mm/s (2,4 a 20,4m/min.) [35].

Devido ao tamanho da poça de fusão ser elevado, em consequência das altas correntes, esse modo de transferência deve ser evitado na utilização fora da posição plana. A figura 2.22 ilustra oscilogramas de corrente e tensão de uma típica transferência por spray. Existem ainda três subdivisões desse tipo de transferência: spray axial ou projetado, spray com alongamento e spray rotacional.

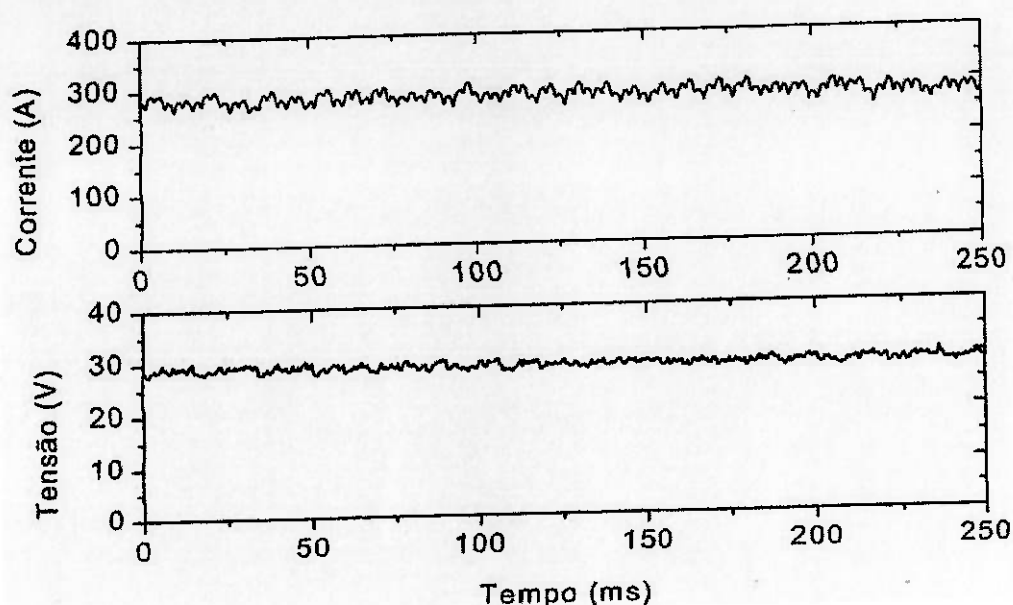


Figura 2.22 - Oscilograma de uma soldagem com transferência por spray. Arame ER 70S-6 de 1,20mm de diâmetro e gás Ar+4%CO₂ [36].

2.3.5.1.b.1 – Transferência do Tipo Spray Projetado (1.2.1-tabela 2.4)

A transferência por spray projetado ocorre devido à ação do peso e das forças de origem eletromagnética. É obtida com correntes próximas da de transição e o diâmetro da gota igual ou ligeiramente inferior ao diâmetro do eletrodo.

É muito estável e apresenta baixa oscilação de corrente e tensão durante a soldagem. Geralmente não apresenta respingos e provoca menor quantidade de fumos em relação ao modo de transferência globular [37].

A ponta do arame eletrodo pode apresentar um pequeno afunilamento durante a formação das gotas, porém menor ou igual ao diâmetro do eletrodo [38]. A taxa de transferência é maior do que do modo curto-circuito ou globular. A figura 2.23 ilustra a transferência metálica por spray projetado.

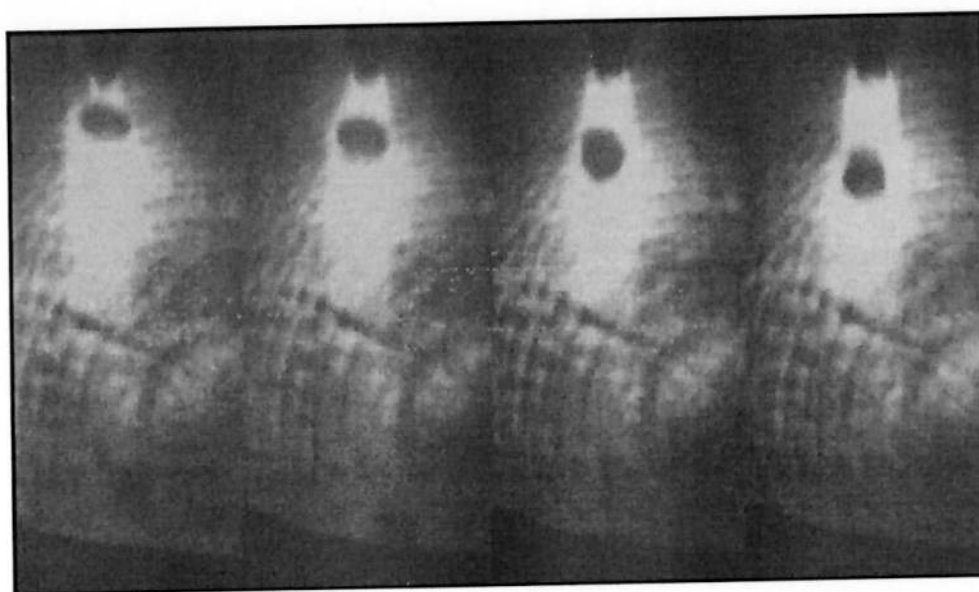


Figura 2.23 - Transferência por spray projetado a 300 A [39].

2.3.5.1.b.2 – Transferência Spray com Alongamento (1.2.2-tabela 2.4)

Os níveis de correntes são maiores que da transferência projetada, com isso o arco funde uma parte do eletrodo que sob ação de forças eletromagnéticas se afina e alonga na extremidade, de onde as gotas se desprendem. A frequência de destacamento das gotas é elevada. As forças que atuam são de origem eletromagnética, forças de arraste devido ao plasma e força mecânica. Este processo visto em câmera lenta aparenta um jato de metal fundido lançado na

mesma direção do arame eletrodo, constituído de gotas bem menores que o diâmetro do arame. Este filamento líquido pode se estender a ponto de tocar a poça de fusão e ocasionar curtos circuitos incidentais, causando desestabilidade no processo. Pode-se soldar em todas as posições, a taxa de deposição é elevada e é um método bastante utilizado na indústria pesada [32].

A figura 2.24 ilustra esse modo de transferência.

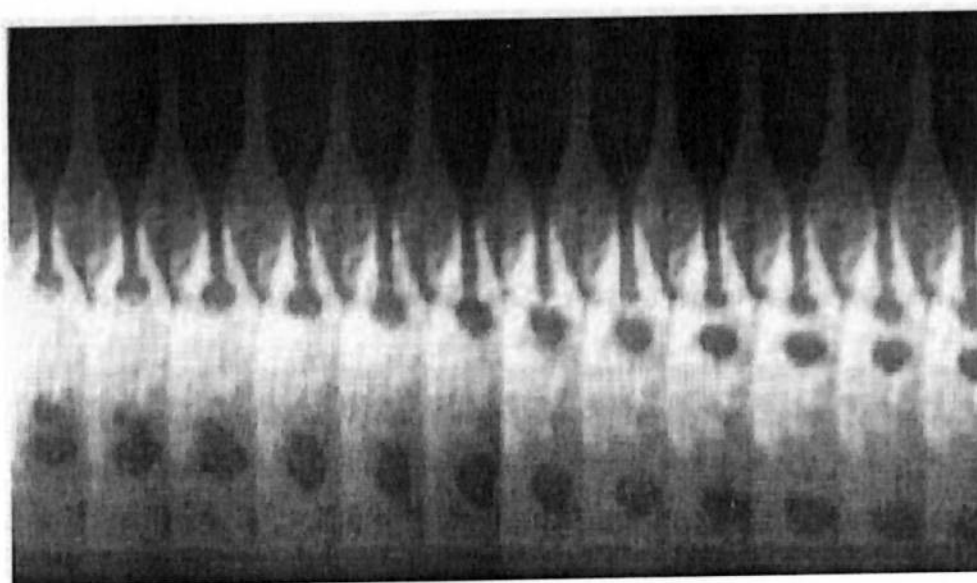


Figura 2.24 - Transferência por spray com alongamento a 360 A [39].

2.3.5.1.b.3 – Transferência do Tipo Spray Rotacional (1.2.3-tabela 2.4)

É o modo de transferência no qual gotas muito pequenas são lançadas da extremidade do eletrodo com ponta bastante alongada. A transferência por spray rotacional ocorre em determinadas situações como quando se usa valores elevados de densidade de corrente (maiores do que no spray com alongamento) e distâncias grandes do bico de contato à peça (DBCP). A extremidade do metal de adição é aquecida a níveis de baixa resistência

mecânica e a ação do campo eletromagnético gera um movimento rotacional provocando movimentos em forma de espiral e fazendo com que as gotas do jato metálico sejam transferidas na direção radial da poça de fusão, provocando respingos [32-39].

Ilustrado na figura 2.25, o spray rotacional já não ocorre com estabilidade como as transferências spray com alongamento e projetado [39].

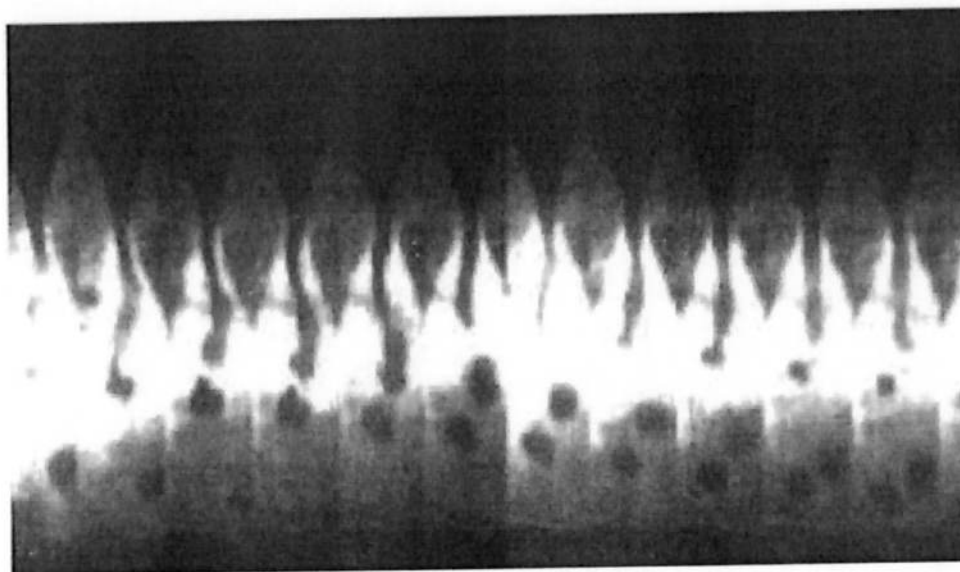


Figura 2.25 - Transferência por spray rotacional a 480 A [39].

2.3.5.1.c – Transferência por Explosão (1.3-tabela 2.4)

A transferência por explosão ocorre devido ao material do eletrodo possuir componentes altamente reativos, que provocam a formação de bolhas de gás no interior das gotas e provocam explosões, gerando grande quantidade de gotas cujo tamanho não é uniforme. Este processo é relativamente instável e, portanto não é desejado na indústria [16-32].

2.3.5.2 TRANSFERÊNCIA POR CONTATO (2-tabela 2.4)

2.3.5.2.a - Transferência por curto circuito (2.1-tabela 2.4)

A transferência por curto circuito ocorre para baixos valores de corrente e tensão de soldagem, para arames mais finos e para quaisquer gases de proteção. É o modo de transferência mais usado na soldagem de aços, particularmente com a proteção de Ar+25%CO₂, fora da posição plana e para peças de pequena espessura (até 6 mm), devido aos baixos valores de corrente e à sua independência da ação da gravidade [22-40].

A gota é destacada pela ação das forças eletromagnéticas e da força devido à tensão superficial da poça de fusão [16].

Na transferência por curto-circuito, o crescimento da gota de metal líquido durante a soldagem em corrente baixa é limitado pelo nível de tensão mais baixa do arco, o que encurta o seu comprimento, Fig. 2.26. A gota de metal fundido na ponta do arame eletrodo transfere-se para a poça de fusão através de um curto circuito [18], de modo que a ponta do eletrodo toca regularmente a poça de fusão com uma frequência de 20 a 200 Hz [32].

O Heat Input tende a ser menor quando comparada a outros tipos de transferências e, conseqüentemente, a penetração é menor.

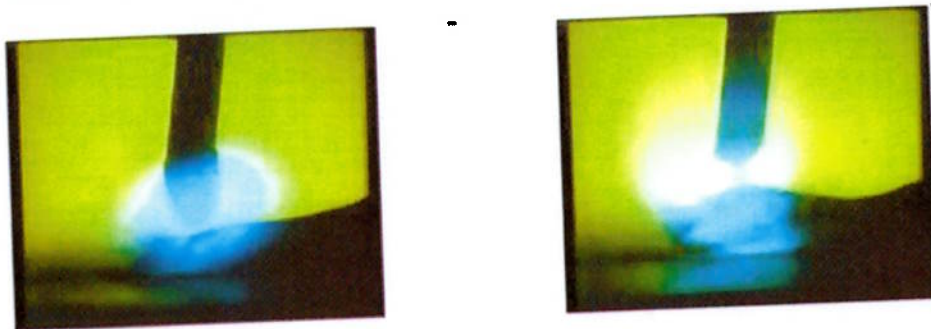


Figura 2.26 - Gota de metal fundido sendo transferida através do curto circuito [18].

O comportamento deste modo de transferência apresenta instabilidade no arco, possível formação de quantidade elevada de respingos e pode ser caracterizado em função do tempo de curto circuito, do tempo de arco, ou da frequência de curto-circuito [40].

Observando-se a figura 2.27, a transferência por curto circuito pode ser descrita cronologicamente da seguinte forma: Após a ocorrência do curto-circuito, o arco elétrico se estabiliza, chegando ao seu comprimento máximo (A). Em seguida, a gota de metal fundido vai aumentando de tamanho na ponta do arame eletrodo e aproximando-se da poça de fusão (B). A velocidade de alimentação do arame é maior do que a velocidade de fusão do eletrodo, o que possibilita a ocorrência de um novo curto-circuito (C). No instante em que ocorre o curto circuito, a tensão de soldagem é reduzida e a corrente tem um pico de crescimento instantâneo. A corrente elevada deste instante aquece rapidamente o arame-eletrodo, por efeito joule, provocando a sua fusão e completando o processo de formação da gota, que é transferida para a poça devido à ação da tensão superficial (D), como pode ser observado nos oscilogramas das fig. 2.28 e 2.29 [21-40].

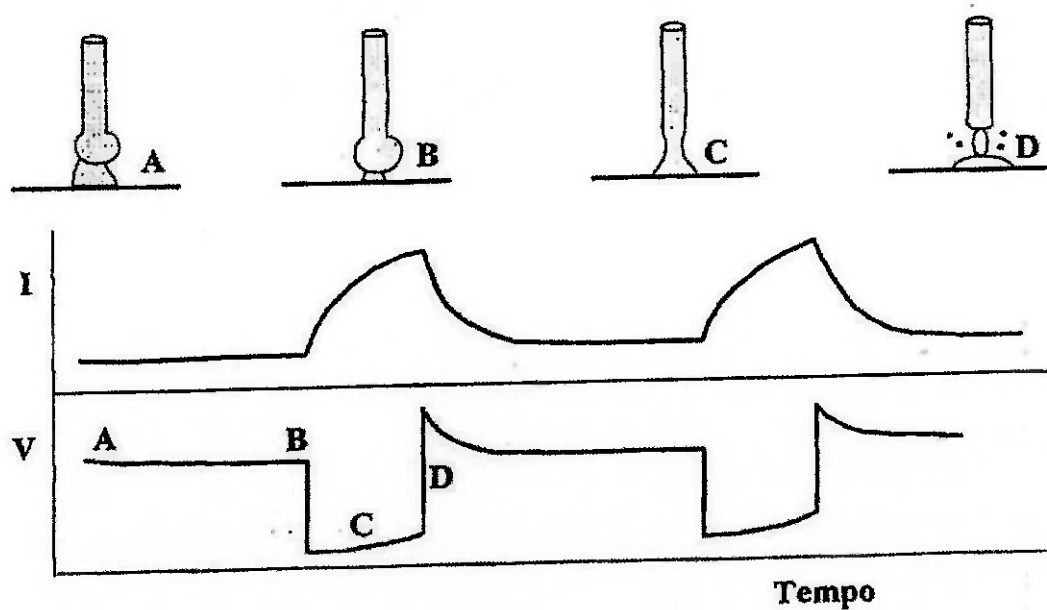


Figura 2.27 – Transferência por curto circuito - representação esquemática [36].

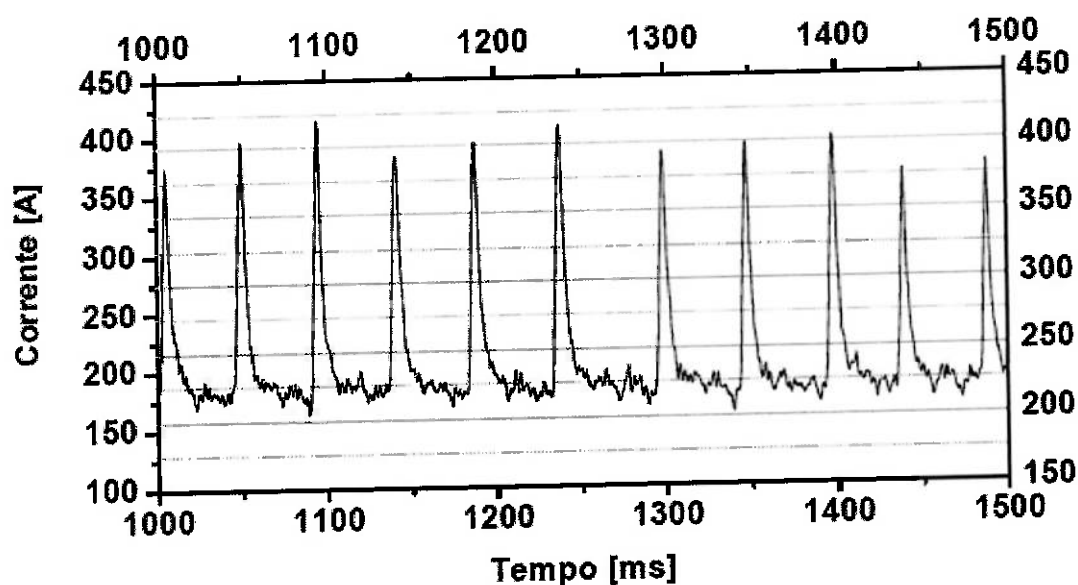


Figura 2.28 – Oscilograma de corrente durante a transferência metálica por curto-circuito, arame AWS ER70S-6, diâmetro de 1,2 mm, gás de proteção Ar+2%O₂ [31].

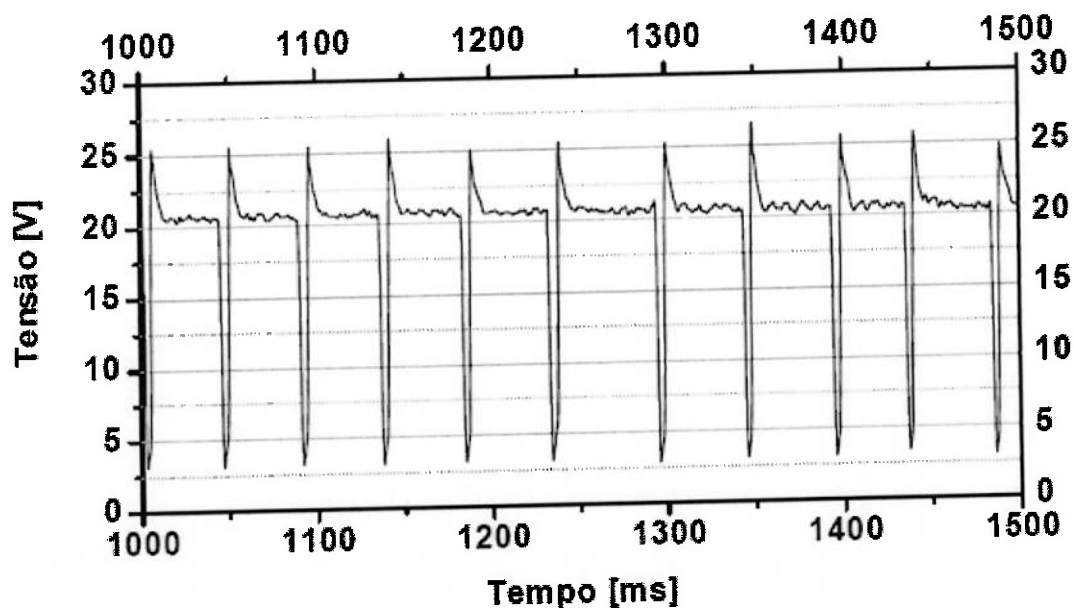


Figura 2.29 – Oscilograma de tensão durante a transferência metálica por curto-circuito, arame AWS ER70S-6, Diâmetro de 1,2 mm, gás de proteção Ar+2%O₂ [31].

As principais variáveis neste modo de transferência são a indutância e a tensão. É a indutância que controla a taxa de variação da corrente elétrica durante a soldagem. Através dela pode-se fazer o controle do efeito de constrição, também chamado efeito *pinch*, do eletrodo durante o aumento da corrente elétrica no instante do curto circuito. A associação do efeito pinch e da tensão superficial provoca o destacamento da gota de metal formada entre o eletrodo e a poça de fusão. Se a indutância for baixa, a corrente tem uma taxa de crescimento muito alta e a transferência ocorre de forma muito brusca, gerando excesso de respingos e instabilidade do arco. Se a indutância for alta, a taxa de crescimento da corrente é baixa, o arame pode mergulhar na poça de fusão antes da ruptura do filete líquido, causando a interrupção do processo. As condições operacionais da soldagem com transferência por curto

circuito podem ser caracterizadas através do estudo de oscilogramas de corrente e tensão do processo (figuras 2.28 e 2.29).

2.3.5.3 TRANSFERÊNCIA PROTEGIDA PELA ESCÓRIA (3-tabela 2.4)

2.3.5.3.a - Transferência Guiada Pela Parede (3.1-tabela 2.4)

Este tipo de transferência ocorre devido à força gerada pela tensão superficial entre a gota e o fluxo fundido. A parede de fluxo fundido é quem guia as gotas para a poça de fusão.

2.3.5.3.b – Outros Tipos de Transferências (3.2-tabela 2.4)

Vários pesquisadores classificam modos mistos de transferência para processos de soldagem e para diversos materiais como eletrodo revestido em aço inoxidável austenítico [41], arame tubular em aço inoxidável ferrítico [33] e arame de alumínio [42]. Algumas dessas experiências apresentaram transferências do tipo misto globular/curto-circuito, globular/curto circuito/globular, globular/curto circuito/spray axial, globular/curto circuito/spray com alongamento, globular/spray axial, globular/spray com alongamento, curto circuito/ricocheteamento, spray com alongamento/curto circuito/ricocheteamento.

2.3.5.4 TRANSFERÊNCIA POR ARCO PULSADO

Até o início dos anos 60, na soldagem elétrica a arco, somente era usada a corrente senoidal cuja frequência era limitada ainda pela frequência da rede de alimentação, 50/60 Hz, o que tornava difícil o controle do processo [43]. Nesta época, pesquisadores do The Welding Institute (Inglaterra) descobriram um modo de transferência metálica aplicando uma corrente pulsada, cujo valor médio era equivalente aos observados com transferência globular, porém sem as desvantagens deste modo de transferência e ainda com as vantagens da transferência por spray [25-30-37-44-45-46-47].

O modo de transferência pulsado é considerado como uma variante do processo MIG-MAG onde há um controle das variáveis do processo de modo a atingir uma transferência similar à por spray, porém com valores de corrente média inferior à corrente de transição.

Durante a soldagem no modo pulsado, o equipamento de soldagem gera dois níveis de corrente: Corrente de base e corrente de pico. A corrente de base (I_b) é mantida baixa de modo que não haja transferência durante essa fase, mas somente o início da fusão do arame. A corrente de pico (I_p) é superior à corrente de transição globular/spray (I_t), ela é responsável por provocar a transferência de uma única gota em condições ótimas de operação. Dessa forma, é possível atingir uma transferência com características de spray, uniforme e com corrente média menor que a de transição.

Com o modo pulsado, consegue-se soldar espessuras menores do que as possíveis com transferência spray e em todas as posições.

Algumas das principais vantagens deste modo de transferência são: Obtenção da transferência por spray em corrente média inferior à corrente de transição; redução ou eliminação na quantidade de respingos e na geração de fumos; possibilidade de soldagem de espessuras mais finas, comparativamente ao modo convencional, devido ao menor aporte térmico; possibilidade de soldagem em todas as posições [09].

Algumas das principais limitações deste modo de transferência são: Necessidade de melhor qualificação da mão de obra empregada, devido à complexidade no ajuste dos parâmetros; Utilização de fontes de soldagem mais sofisticadas e mais caras do que no modo convencional [09].

A terminologia usual para descrever as variações de corrente durante a soldagem MIG-MAG com aplicação de corrente pulsada perfeitamente retangular é ilustrada na figura 2.30 [45-25].

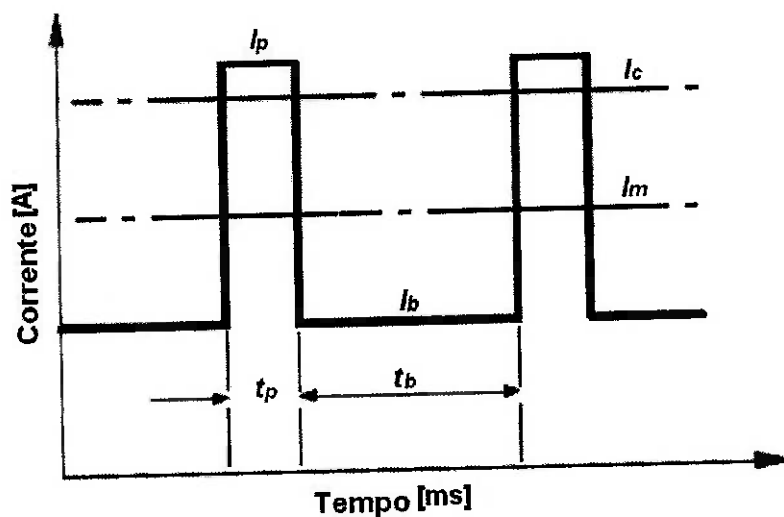


Figura 2.30 - Terminologia aplicada em GMAW-P: I_p - corrente de pico, I_b - corrente de base, I_c - corrente de transição, I_m - corrente média, t_p - tempo de pico e t_b - tempo de base [45-25].

A figura 2.31 - apresenta oscilograma de uma soldagem com transferência por arco pulsado.

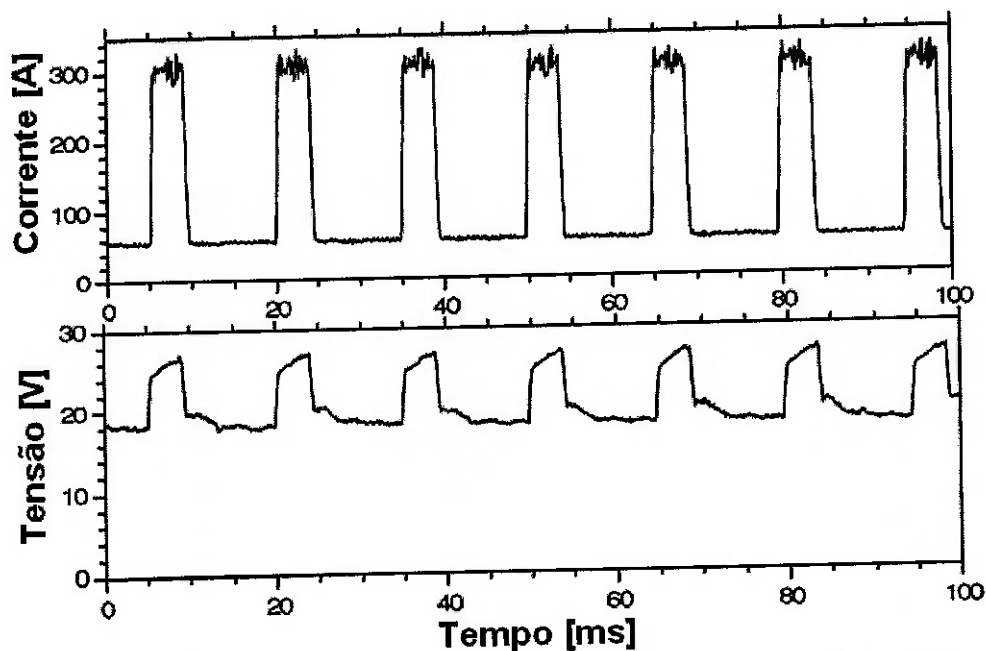


Figura 2.31 - Oscilogramas de corrente e tensão em GMAW-P: arame AWS 70S-6; com 1,2 mm de diâmetro, gás de proteção Ar+2%O₂ [48].

Para um determinado valor de I_p (superior a I_c), se o tempo de pico (t_p) for muito pequeno, a curta duração do pulso de corrente não será suficiente para garantir o destacamento da gota de metal líquido. Desta forma, a gota somente será transferida para a poça de fusão após vários períodos de pico, passando a ser assim um tipo de transferência globular [47].

Se o tempo de pico for muito longo, podem se destacar várias gotas de metal em um único período e a transferência será do tipo "spray". Entretanto, haverá mudança do tipo de transferência durante o período de pico, passando de spray projetado na primeira gota destacada durante este período para spray com alongamento nas demais gotas [47].

Para soldagem pulsada com tempos de pico intermediários, uma única gota de metal líquido é transferida para cada pulso de corrente e o modo de transferência mantém-se como spray projetado. Este é o tipo de transferência que possui as características mais favoráveis do modo spray e, portanto, é a mais desejada para a corrente pulsada [49-47-25].

O uso de corrente pulsada para se conseguir um modo específico de transferência metálica pode oferecer muitas vantagens, porém este método exige cuidado na seleção e correlação de um grande número de parâmetros [47]. A Tabela 2.5 mostra a influência destes parâmetros na soldagem.

Tabela 2.5 - Influência dos parâmetros na soldagem com corrente pulsada [15].

Parâmetro	Influência
Velocidade de soldagem	Penetração e modo de transferência metálica
Diâmetro do arame	Penetração
Velocidade de alimentação	Penetração e forma da gota
Gás de proteção	Estabilidade do arco, modo de transferência, formato do cordão e destacamento da gota fundida.
Corrente de pico	Modo de transferência metálica, alongamento do eletrodo, penetração e destacamento da gota fundida.
Tempo de pico	Número de gotas destacadas por pico
Corrente de base	Destacamento das gotas fundidas, temperatura do metal transferido, fluidez, largura do cordão de solda, molhabilidade do filete de solda e tamanho da gota.
Corrente média	Modo de transferência metálica
Frequência	Número de gotas destacadas por pulso e corrente média
Ciclo de trabalho	Número de gotas destacadas por pulso
Taxa de resposta	Taxa de fusão, diâmetro das gotas, plano de fusão e área de reforço.

3. OBJETIVOS

Estudo comparativo das taxas de deposição e eficiência de deposição entre os processos FCAW (E71T-1C) e GMAW (ER70S-6) como ferramenta para tecnólogos e engenheiros de soldagem das indústrias metalúrgicas em geral, com o intuito de promover maior conhecimento na aplicação destes dois arames eletrodos, aumentando o grau de confiabilidade na escolha do consumível de soldagem mais produtivo e de menor custo para cada aplicação, na soldagem de chapas de aço de baixo teor de carbono e na posição plana horizontal.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. BANCADA DE TRABALHO

Toda a descrição de montagem da bancada experimental e todos os materiais utilizados como metal base e consumíveis e também os recursos, como acessórios e equipamentos empregados para este experimento, estão descritos na figura 4.1 de forma objetiva. Os testes de soldagem foram feitos na posição plana por simples deposição de cordões sobre chapas de aço.



Figura 4.1 – Foto da bancada do experimento com todos os equipamentos montados. Legenda: 1 Notebook; 2 Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem – IMC; 3 Sistema de deslocamento linear; 4 Arame tubular E71T-1C; 5 Arame sólido ER70S-6; 6 Alimentador de arame e fonte de energia; 7 Balança de precisão; 8 Cronômetro; 9 Metal base; 10 Água para resfriamento da peça

4.1.1 METAL DE BASE

A Chapa de aço utilizada como metal de base foi ASTM A36 com 8 mm de espessura. A tabela 4.1 apresenta a composição química típica deste aço.

Tabela 4.1 - Composição Química Típica do aço ASTM A36.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al
0,25 máx	0,40 máx	0,80/ 1,20	0,040 máx	0,050 máx	-	-	-	-	-	-

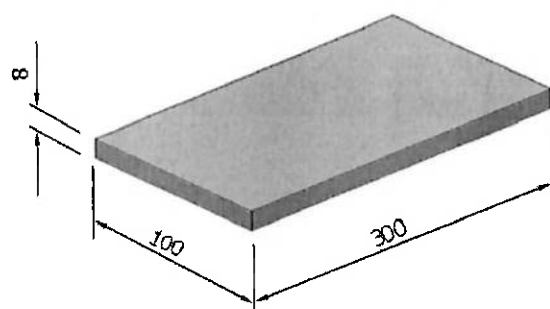


Figura 4.2 - Dimensões da chapa de aço ASTM A36.

4.1.2 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM UTILIZADO

Os parâmetros utilizados estão descritos a seguir.

ARAME TUBULAR	AWS A5.20 ER 71T-1 Ø 1,2mm
ARAME SÓLIDO	AWS A5.18 ER70S-6 Ø 1,2mm
GÁS DE PROTEÇÃO	CO2 e mistura Ar+25%CO2
VAZÃO DO GÁS DE PROTEÇÃO	15 l/min
CORRENTE	200 e 250 A
TENSÃO	20 a 30 V
DBCP	12 e 20 mm
POSIÇÃO DE SOLDAGEM	PLANA

Foram feitas três repetições de cada experimento em 48 corpos de prova.

4.1.3 AQUISIÇÃO DE DADOS DE SOLDAGEM

O Sistema de aquisição de dados IMC, figura 4.3, é uma ferramenta para análise do processo de soldagem que permite captar os sinais instantâneos de corrente, tensão de arco, velocidade do arame e vazão de gás durante a soldagem do processo MIG-MAG. Possui sensores para coletar os sinais e um software para interpretar estes sinais e colocar na tela do computador de maneira dinâmica, todas estas variáveis de soldagem em forma de oscilogramas ou histogramas, com valores médios e eficazes, permitindo estudos mais detalhados do processo de soldagem.

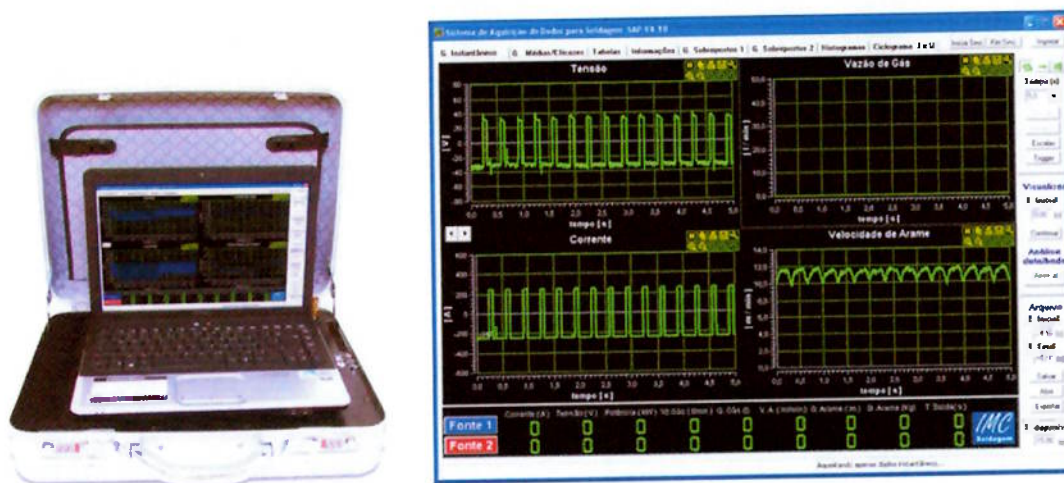


Figura 4.3 – Sistema portátil de monitoramento de processos de soldagem IMC.

4.1.4 FONTE DE ENERGIA

A fonte de soldagem utilizada foi uma fonte convencional de tensão constante e corrente contínua. Equipamento robusto, de produção, com capacidade para 600 A à 60% (FT) e alimentador de arame convencional.

4.1.5 TOCHA

A tocha de soldagem é o equipamento responsável por guiar o arame eletrodo, conduzir a corrente elétrica e o gás de proteção até a peça que está sendo soldada. Neste experimento a tocha utilizada foi um modelo sem refrigeração (seca), projetada para a soldagem manual. Ela foi adaptada ao robô de soldagem linear de forma a manter-se no ângulo de 90°, medidos em relação ao plano da superfície da peça. Estes ajustes foram feitos com a ajuda de esquadros e escala em milímetros.

Para todos os ensaios o bico de contato foi mantido no mesmo nível do bocal da tocha, ou seja sem recuo, como mostra a figura 4.4.



Figura 4.4 – Tocha seca manual adaptada para soldagem automática usada no experimento.

Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP) usado: 12 e 20 mm

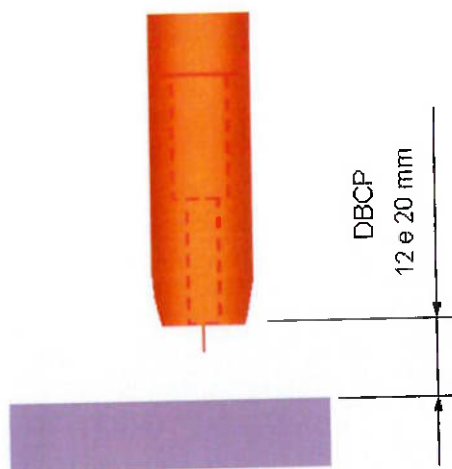


Figura 4.5 – Ilustração do bocal e da DBCP usados no experimento.

4.1.6 SISTEMA DE DESLOCAMENTO LINEAR

Este sistema de deslocamento linear é utilizado para automatizar a soldagem, principalmente fora da posição plana, soldas longas e em superfícies curvadas. Este equipamento normalmente substitui o operador em posições anti ergonômicas para garantir repetibilidade dos cordões de solda. A tocha de soldagem é montada no sistema de carrinho e movimentam-se ao longo de um trilho flexível com velocidade controlada com precisão na trajetória e direção desejada. O Carrinho habilita a pistola de soldagem a operar com movimento preciso e estável do início até o final da operação, mantendo sempre a mesma velocidade e a mesma distância do bico de contato à peça. Este sistema, comparativamente à soldagem manual, elimina a inconsistência da habilidade humana e a dificuldade de manter-se na mesma posição por muito tempo em posição anti ergonômica.

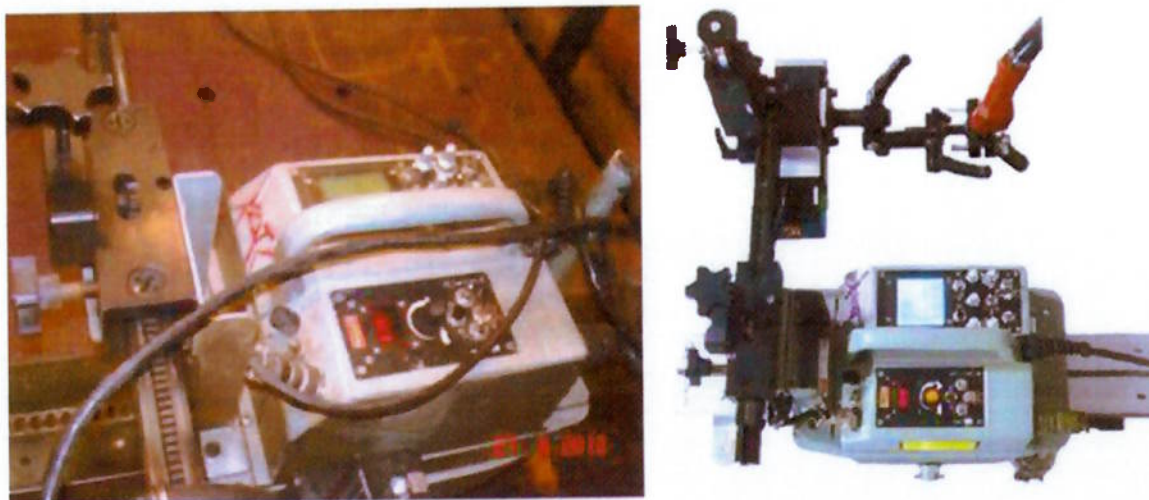


Figura 4.6 – Foto do sistema de deslocamento linear de soldagem utilizado no experimento e foto de um modelo similar novo.

4.1.7 BALANÇA DE PRECISÃO

A balança utilizada para medição da massa do arame e dos cordões de solda foi um modelo similar à figura 4.7, com capacidade máxima de 2 kg e precisão de 0,01 g.



BALANÇA OHAUS

Modelo: TS4KS Precision Plus

Capacidade: 2 kg

Precisão: 0,01 g

Figura 4.7 – Balança eletrônica de precisão utilizada no experimento.

4.1.8 CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM

Neste trabalho foram utilizados dois processos de soldagem, o GMAW (MIG-MAG) e o FCAW (Arame tubular). Os consumíveis utilizados foram o arame sólido de fabricação nacional e o arame tubular de fabricação coreana, ambos destinados à soldagem de aços comum de baixo teor de carbono. O arame tubular do tipo rutílico com proteção gasosa (AWS A5.20 E71T-1C) com diâmetro nominal de 1,2 mm e o arame sólido cobreado (AWS A5.18 ER70S-6) com diâmetro nominal de 1,2 mm. A composição química (e ensaios mecânicos para o eletrodo tubular) destes arames eletrodos, fornecidas pelos fabricantes, são mostradas nas tabelas 4.2 e 4.3.

4.1.8.1 ARAME SÓLIDO

4.1.8.1.a - Especificação do arame:

Especificação: AWS A5.18-05 ER70S-6 Ø 1,2mm

Tabela 4.2 – Composição química típica do metal depositado e da Norma AWS.

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al
Metal de Solda	0,0820	0,828	1,543	0,018	0,018	0,014	0,033	0	0	0,022	0,0005
Especificação	0,06-0,15	0,80-1,15	0,04-0,85	≤ 0,025	≤ 0,035	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,15	≤ 0,03	≤ 0,5	-

4.1.8.1.b - Armazenamento:

Após a embalagem aberta e durante os dias em que os testes foram realizados, este arame ficou armazenado em estufa com temperatura de aproximadamente 10°C acima da temperatura ambiente.

4.1.8.2 ARAME TUBULAR

4.1.8.2.a - Especificação do arame:

Especificação: AWS A5.29-05 E71T-1C Ø 1,2mm

Tabela 4.3 – Composição química, propriedades mecânicas e teste de impacto.

	Análise Química									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
Metal de Solda	0,05	0,58	1,23	0,016	0,013	0,03	0,04	0,01	0,02	0,01
Especificação	≤ 0,12	≤ 0,9	≤ 1,75	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,5	≤ 0,2	≤ 0,3	≤ 0,08	≤ 0,35
Propriedades Mecânicas					Teste de Impacto					
Propriedades Mecânicas	L.E. (MPa)	L.R. (MPa)	Along. (%)	Impacto (J) -20°C						
	554	595	27,2	X1	X2	X3	Média			
				30	30	34	31			
Especificação	≥ 400	482~655	≥ 22	≥ 27						

4.1.8.2.b - Armazenamento:

Após a embalagem aberta e durante os dias em que os testes foram realizados, este arame ficou armazenado em estufa com temperatura 10°C acima da temperatura ambiente para evitar que houvesse alguma absorção de umidade e conseqüentemente interferência nos resultados dos testes.

4.1.8.3 GÁS DE PROTEÇÃO

Os gases recomendados pelos fabricantes dos arames utilizados neste trabalho são: dióxido de carbono (CO₂) para ambos os materiais e mistura Ar+25%CO₂ para o arame sólido. Embora a mistura de Ar+CO₂ não seja recomendada pelo

fabricante para o arame tubular, foram feitos os experimentos nas mesmas condições e com os mesmos gases para os dois arames a fim de observar e comprovar os resultados.

4.2. EXPERIMENTO

Foram feitas oito combinações distintas das condições operacionais de soldagem com cada tipo de arame (sólido e tubular), sendo elas: Gás (CO₂ e Mistura Ar+CO₂), Distância do Bico de Contato à Peça (DBCP: 12 e 20 mm) e Intensidade de Corrente (200 e 250 A). Foram realizados ainda três (3) cordões de solda para cada condição operacional avaliada.

O sistema de deslocamento linear, que controla a velocidade de movimentação da tocha, foi montado sobre uma bancada, na posição plana/ horizontal de soldagem. Foi ajustado para fazer cordões simples sobre chapa e sem oscilação. Através deste equipamento foi possível ajustar a velocidade de soldagem nos níveis desejados. A velocidade utilizada foi de 5 mm/segundos para todos os cordões.

A vazão do gás de proteção foi medida no bocal com debímetro e ajustada para uma vazão de 15 l/min imediatamente antes da soldagem.

Para a definição dos parâmetros de soldagem foram tomados como base os parâmetros definidos em outros trabalhos feitos com soldagem na posição plana com comparação entre arames sólidos e tubulares [50]. Pelas recomendações do fabricante do arame tubular (dados de catálogo para a bitola de 1,2 mm) é recomendada a soldagem dentro da faixa de corrente de

120 a 300 A. Pelas recomendações do fabricante do arame sólido (dados de catálogo para a bitola de 1,2 mm) é recomendada a soldagem dentro da faixa de corrente de 120 a 380 A. Portanto os dois níveis de corrente escolhidos foram de 200 e 250 A.

A corrente inicialmente foi pré ajustada com 200 A para o arame sólido, com uma DBCP de 12 mm e com mistura gasosa de Ar+25%CO₂. Posteriormente para cada uma das alterações de DBCP e Gás, não houve novo ajuste de corrente para que as conseqüências ocorridas na soldagem pudessem ser analisadas puramente. Da mesma forma, um pré ajuste com o arame tubular foi feito inicialmente, com 200 A, DBCP de 12 mm e mistura gasosa de Ar+25%CO₂. Quando alterado o nível de corrente para 250 A, este procedimento de ajuste da corrente, para ambos os arames, foi repetido.

Após estes ajustes os valores resultantes de corrente, tensão do arco e velocidade de alimentação do arame durante a soldagem, foram coletados através de Sistema de Aquisição de Dados acoplados a um computador e controlados por um software, conforme Figura 4.8.

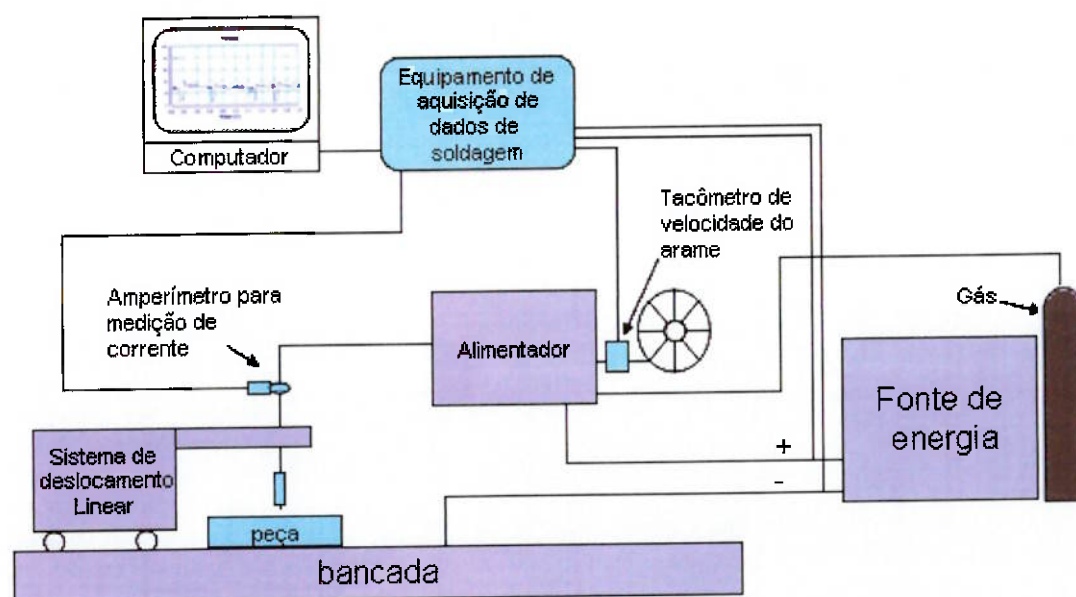


Figura 4.8 – Representação esquemática da montagem experimental

A figura 4.9 mostra a matriz de experimentos elaborada para 16 situações diferentes, sendo arame de solda, DBCP, gás de proteção e nível de corrente de soldagem.

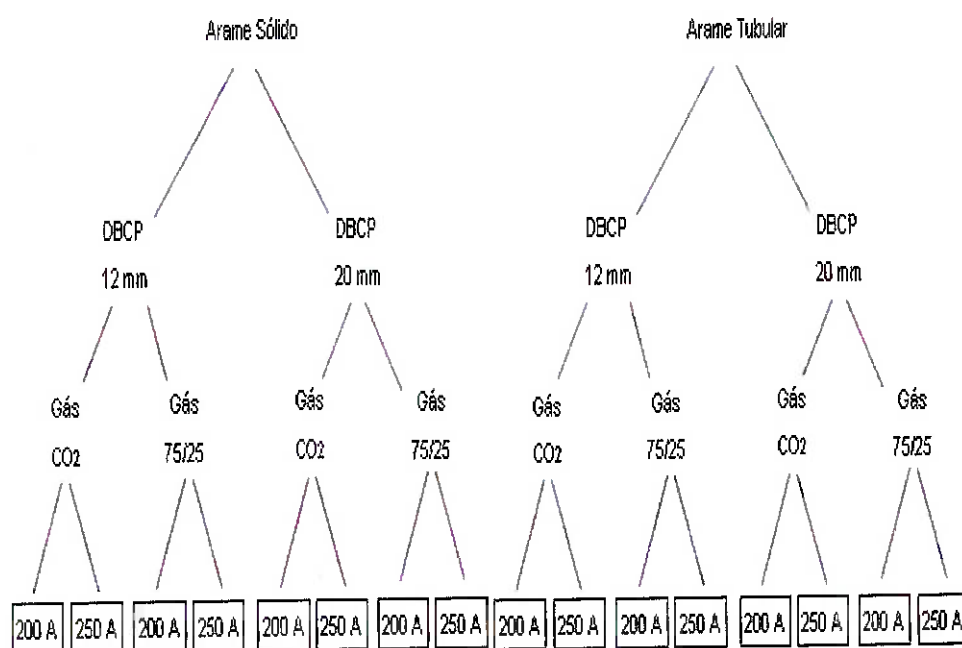


Figura 4.9 - Matriz de experimentos com as 16 combinações possíveis de parâmetros.

A figura 4.10 ilustra o corpo de prova soldado com os três cordões de solda, sendo que dois cordões foram feitos de um lado da chapa e um cordão no verso da mesma.

Todos os parâmetros usados na soldagem estão nas tabelas 4.4 e 4.5.

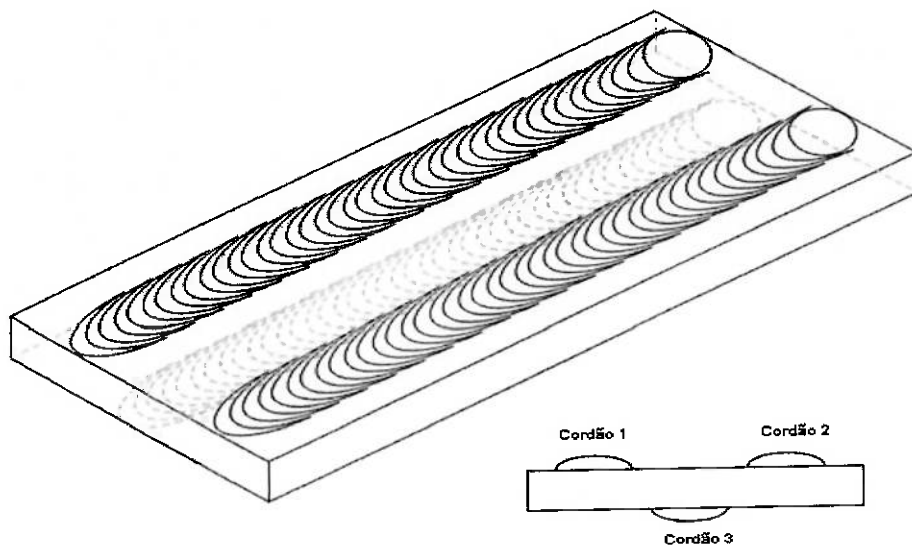


Figura 4.10 - Corpo de prova com os três cordões de solda

4.2.1 LIMPEZA DOS CORDÕES

Os cordões feitos com o arame tubular tiveram a remoção da escória feita cuidadosamente para posterior pesagem e a superfície do cordão foi escovada com escova de aço.

4.2.2 RESFRIAMENTO

A soldagem foi feita na seqüência mostrada na figura 4.10. Após cada cordão e passado de um a dois minutos, tempo suficiente para a limpeza da escória (caso do arame tubular) e soltura das fixações da chapa na bancada, foi utilizado um balde com água para refrigeração do corpo de prova com o objetivo de prepará-lo para receber o próximo cordão de solda. Este

procedimento garantiu que a chapa estivesse sempre na mesma temperatura (ambiente) antes do início do segundo cordão e antes do terceiro. Após o terceiro cordão a chapa soldada foi deixada para resfriamento ao ar. Os corpos de prova retirados para as micrografias foram sempre do terceiro cordão de cada chapa, pois foram estes que tiveram o resfriamento ao ar.

4.2.3 MEDIÇÕES DIVERSAS

Cada chapa de aço foi secada (após resfriamento com água), pesada e identificada antes da soldagem do 2º e 3º cordões, conforme figura 4.11. Também foram pesados os carretéis de arame antes e depois da soldagem de cada cordão. As pontas de arame e a escória removida foram pesadas com a precisão de 1 centésimo de grama, conforme balança mostrada na Figura 4.7. O tempo de arco aberto foi cronometrado, bem como os comprimentos dos cordões medidos com escala em milímetros.



Figura 4.11 - Exemplo de identificação de cada cordão de solda realizado.

4.2.4 MEDIÇÕES COM O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE SOLDAGEM

Foram coletados os gráficos de cada cordão de solda, com o Sistema de Aquisição de Dados de Soldagem, para análise do número de curtos circuitos, frequência de destacamento da gota, tipo de transferência e posterior cálculo

de diâmetro da gota transferida. Foram gravados períodos com o mínimo de 200 milissegundos, com oscilogramas de corrente, tensão e velocidades de alimentação de arame, conforme exemplificado na figura 4.12. Estes oscilogramas podem ser vistos nos anexos deste trabalho.

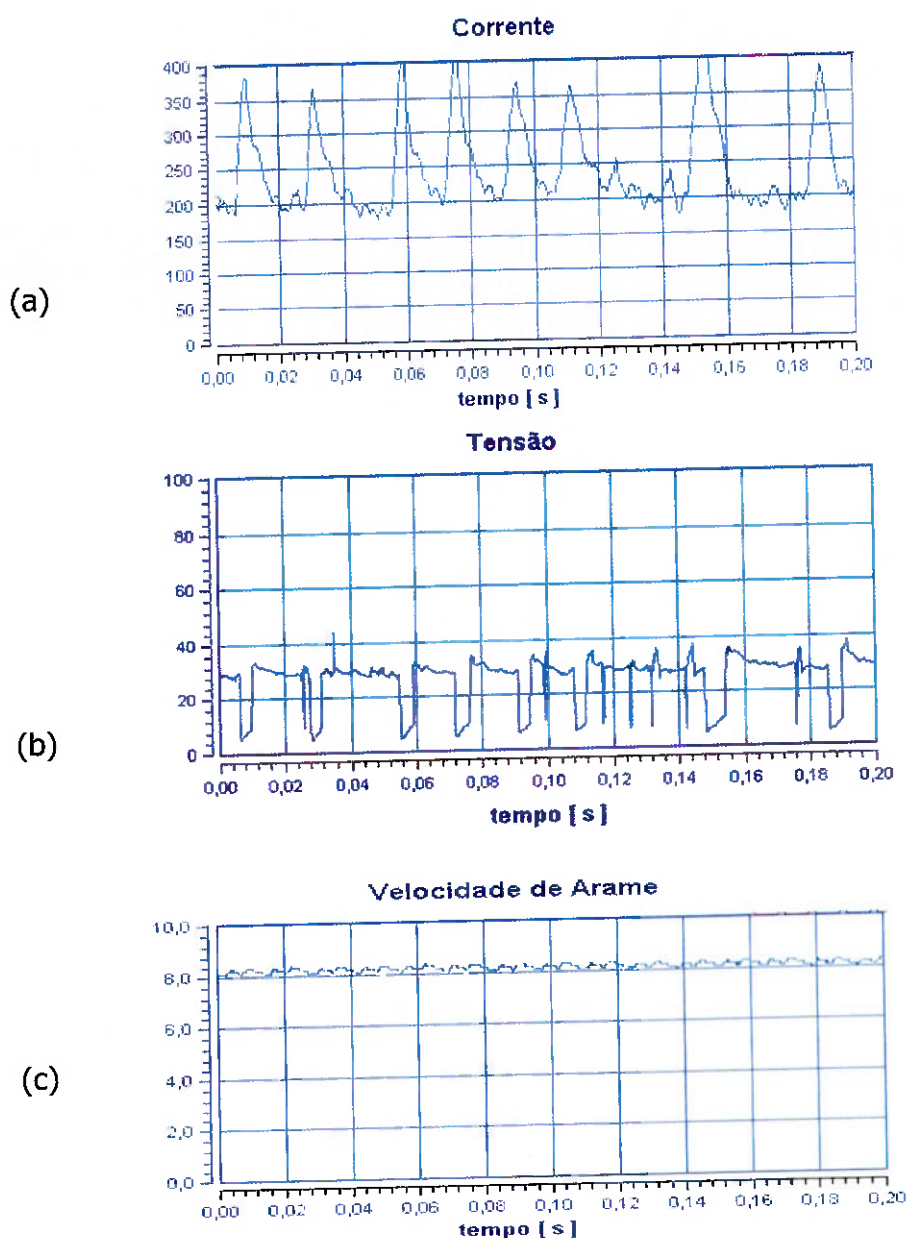


Figura 4.12 - (a) Oscilograma de corrente; (b) oscilograma de tensão; (c) Oscilograma de velocidade de alimentação de arame. Cordão de solda (nº19) com o arame ER70S-6, DBCP de 12 mm, 250 A, 28 V e Gás CO₂.

As tabelas 4.4 e 4.5 mostram os parâmetros usados na soldagem durante o experimento. Os números dos cordões não seguem uma ordem crescente contínua devido à parte do experimento que foi abortada, pois a matriz inicialmente previa que a soldagem fosse feita também na posição vertical com todas as repetições de combinações de parâmetros.

Tabela 4.4 – Parâmetros de soldagem utilizados com o arame ER70S-6.

Nº do cordão	DBCP (mm)	GÁS (Ar/CO ₂)	Veloc. alim. do arame (m/min)	Comprimento do cordão (mm)	Tensão de Arco (V)	Corrente pré ajustada (A)	Corrente média no oscilograma (A)	Velocidade de Soldagem (mm/s)
1	12	75/25	7,00	294	28	200	230	5,61
2			7,00	290	28		230	5,50
3			6,60	290	28		230	5,60
7	12	CO ₂	7,90	295	30	200	210	5,60
8			7,80	293	30		200	5,43
9			6,80	285	30		200	5,55
13	12	75/25	8,60	294	28	250	270	5,52
14			6,80	295	28		253	5,56
15			8,40	295	28		245	5,50
19	12	CO ₂	8,20	290	29	250	242	5,53
20			8,00	290	30		247	5,59
21			7,60	287	30		200	5,38
25	20	75/25	6,80	285	29	200	200	5,53
26			6,80	285	30		204	5,50
27			6,80	290	30		194	5,58
31	20	CO ₂	7,90	285	30	200	200	5,45
32			7,80	289	30		200	5,36
33			8,00	267	34		200	5,27
37	20	75/25	8,20	294	29	250	230	5,47
38			9,40	285	28		250	5,60
39			10,20	295	29		250	5,47
43	20	CO ₂	9,50	285	30	250	210	5,49
44			8,50	280	30		200	5,47
45			9,78	280	31		228	5,37

Tabela 4.5 – Parâmetros de soldagem utilizados com o arame E71T-1C.

Nº do cordão	DBCP(mm)	GÁS (Ar/CO ₂)	Veloc. alim. do arame (m/min)	Comprimento do cordão (mm)	Tensão de Arco (V)	Corrente pré ajustada (A)	Corrente média no oscilograma (A)	Velocidade de Soldagem (mm/s)
49	12	75/25	8,10	285	27	200	213	5,39
50			8,10	280	27		205	5,61
51			8,10	285	26		219	5,48
55	12	CO2	6,30	300	25	200	190	5,01
56			6,20	295	25		190	5,62
57			6,20	290	25		190	5,42
61	12	75/25	9,30	287	26	250	247	5,58
62			10,10	285	25		252	5,50
63			9,60	293	26		246	5,43
67	12	CO2	12,20	290	27	250	257	5,42
68			11,90	283	27		251	5,56
69			11,80	290	27		242	5,57
73	20	75/25	7,50	285	27	200	178	5,40
74			8,20	290	27		190	5,39
75			8,00	287	27		200	5,47
79	20	CO2	8,60	281	28	200	200	5,65
80			8,40	285	27		200	5,58
81			8,40	291	27		200	5,57
85	20	75/25	11,40	293	26	250	220	5,49
86			10,70	287	26		247	5,56
87			11,10	283	26		225	5,58
91	20	CO2	11,80	285	25	250	250	5,59
92			12,20	291	26		250	5,38
93			12,00	285	28		250	5,62

A velocidade de soldagem programada no sistema de deslocamento linear foi de 5,5 mm/s, entretanto, devido à forma manual de medição com cronômetro digital, nas tabelas 4.4 e 4.5 as velocidades de soldagem apresentam variações entre 5 e 6%.

4.2.5 MACROGRAFIAS

4.2.5.1 MÉTODO DE PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As chapas com os três cordões de solda cada uma, foram divididas em partes, sendo 25 mm do início e do fim dos cordões de solda, descartados. Também foram descartados mais 30 mm (1/8 do comprimento restante do cordão de solda). Assim foram coletadas as três amostras para as macrografias, conforme figura 4.13.

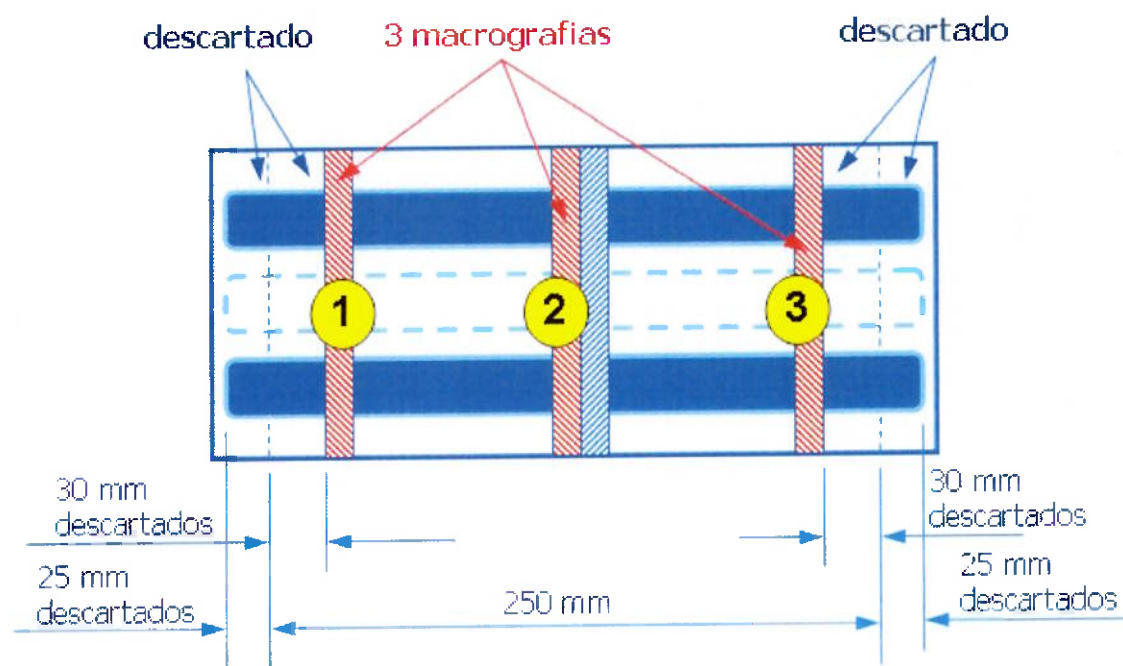


Figura 4.13 - Método de preparação de amostras para as macrografias.

4.2.6 DIMENSÕES DOS CORDÕES DE SOLDA

Através das macrografias feitas foi possível encontrar as dimensões dos cordões de solda como segue:

l = largura do cordão

h = altura do cordão

p = penetração do cordão

α_d = ângulo do reforço direito

α_e = ângulo do reforço esquerdo

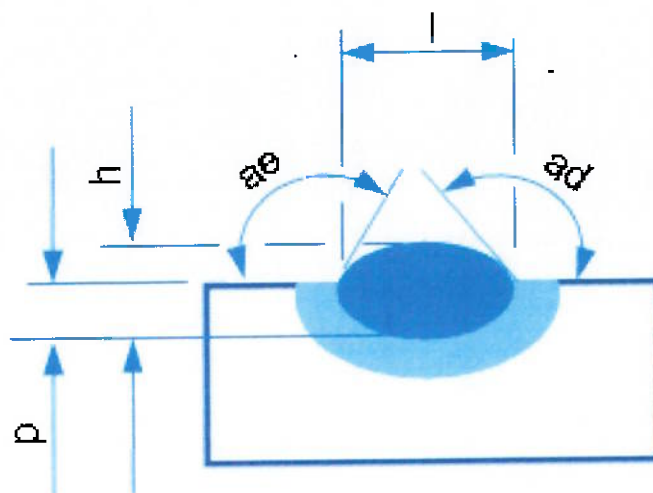


Figura 4.14 - Método de dimensionamento do cordão de solda.



Figura 4.15 - Lupa estereoscópica, STEMI 2000-C (Zeiss, Germany),

Programa de aquisição de imagem para medição: AxioVision Release 4.5

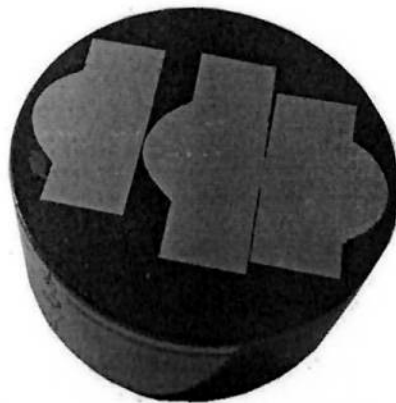


Figura 4.16 - Macroataque: 4% ácido pícrico (diluído em HCl +álcool).

4.2.7 CALCULO DA TAXA DE DEPOSIÇÃO

Experimental

A equação 4.1 foi utilizada para calcular a taxa de deposição de cada experimento.

$$T_d = \frac{P_f - P_i}{T_a} \quad (4.1)$$

Onde:

T_d = Taxa de deposição (Kg/h)

P_f = Peso da chapa final (Kg)

P_i = Peso da chapa inicial (Kg)

T_a = Tempo de arco aberto (h)

Para determinação da taxa de deposição foram utilizados os dados coletados durante o experimento (item 4.2).

4.2.8 CALCULO DA DILUIÇÃO

O cálculo da diluição foi feito através da fórmula:

$$D = \frac{A_p}{A_t} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde:

D = Diluição (%)

A_p = área penetrada

A_t = área total do cordão de solda

$$A_t = A_p + A_d \quad (4.3)$$

Onde:

A_d = área depositada

A figura 4.17 mostra em detalhes as áreas definidas como área depositada, área penetrada e área total.

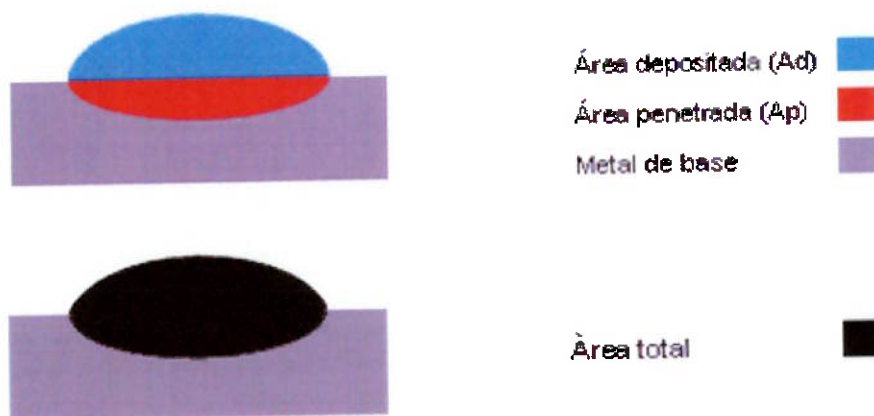


Figura 4.17 - Ilustração das áreas definidas na seção transversal do cordão de solda.

4.2.9 CALCULO DO DIÂMETRO DA GOTA

O cálculo do diâmetro da gota foi feito através das fórmulas:

Volume do arame:

$$V_a = \frac{\pi \times D_a^2}{4} \times V_{alim} \times t \quad (4.4)$$

Onde:

V_a = Volume do arame (mm^3)

D_a = Diâmetro do arame (mm)

V_{alim} = Velocidade de alimentação do arame (m/min)

Volume de 1 gota

$$V_{1gota} = \frac{V_a}{F_{dest}} \quad (4.5)$$

Onde:

V_{1gota} = Volume de uma gota (mm^3)

F_{dest} = Frequência de destacamento da gota

Supondo que a gota seja esférica, temos:

$$V_{1gota} = \frac{4 \times \pi \times R_{gota}^3}{3} \quad (4.6)$$

Onde:

R_{gota} = Raio da gota (mm)

$$R_{gota} = \sqrt[3]{\frac{3 \times D_a^2 \times V_{alim} \times t}{16 \times F_{dest}}} \quad (4.7)$$

Massa da gota:

$$M_{gota} = \rho_{gota} \times V_{1gota} \quad (4.8)$$

Onde:

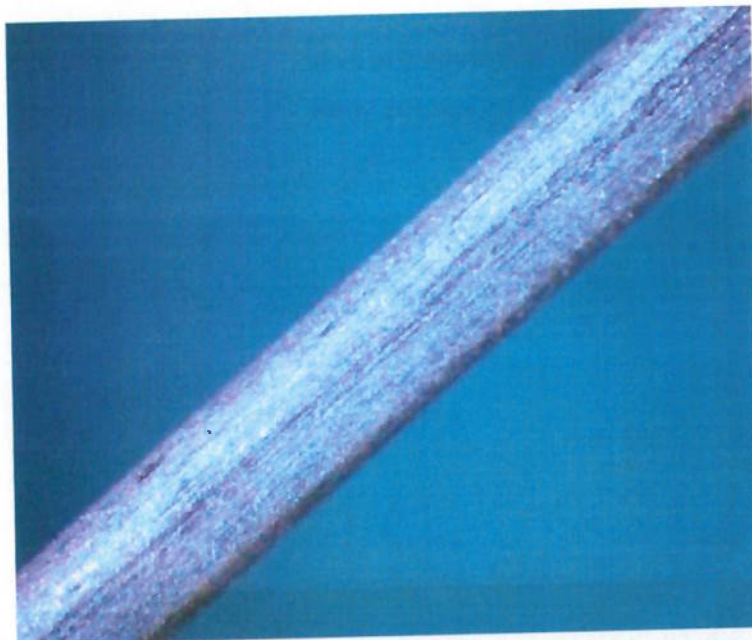
M_{gota} = Massa da gota (g)

ρ_{gota} = Densidade do aço da gota (g/cm^3)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DIMENSIONAL DOS CONSUMIVEIS

(a)



(b)

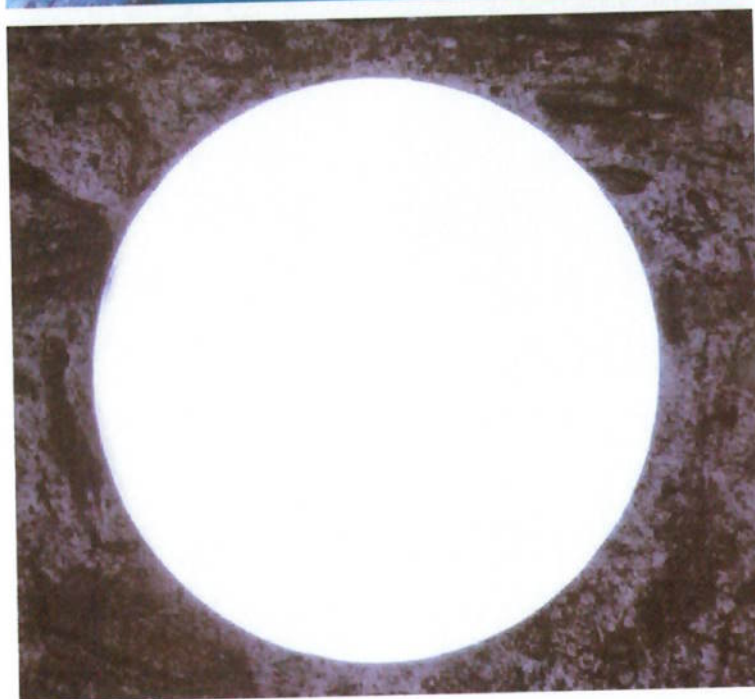
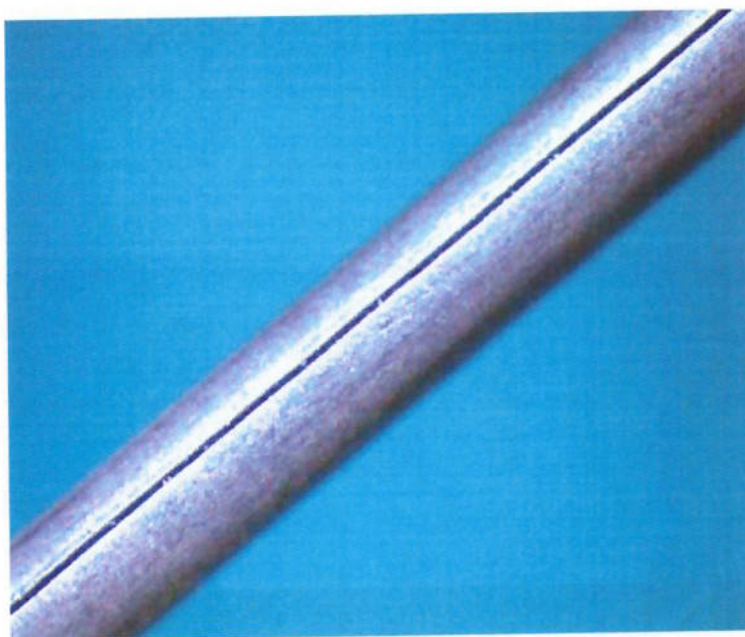


Figura 5.1 - (a) Foto do arame sólido com 5X de aumento. (b) Seção transversal do arame sólido com diâmetro de 1,2 mm e aumento de 50X.

(a)



(b)

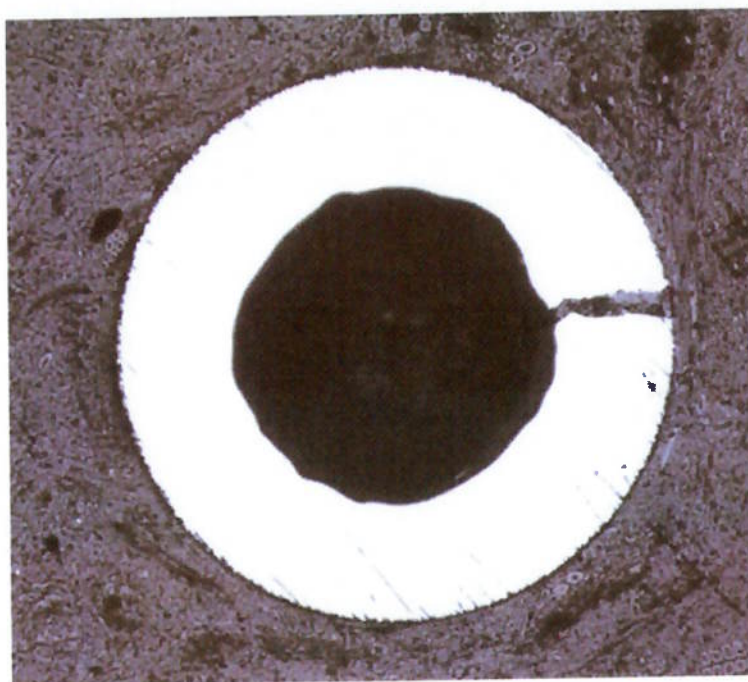


Figura 5.2 - (a) Foto do arame tubular com 5X de aumento. (b) Seção transversal do arame tubular com diâmetro de 1,2 mm e aumento de 50X.

Tabela 5.1 – Resultado das medições de laboratório da seção transversal de um arame tubular de 1,2 mm de diâmetro.

Diâmetro externo	1,17 mm
Diâmetro do furo (média de 4 medições)	0,64 mm
Espessura da parede (média de 8 medições)	0,27 mm
Área total (AT) da seção transversal do tubo	1,08 mm ²
Área da seção transversal do furo (AF)	0,32 mm ²
Área efetiva da seção transversal da parede do tubo (AT-AF)	0,76 mm ²

Tabela 5.2 – Resultado das medições de laboratório da seção transversal de um arame sólido de 1,2 mm de diâmetro.

Diâmetro externo	1,20 mm
Área total (AT) da seção transversal do arame	1,13 mm ²

Estas são as características que distinguem os dois tipos de arames e justificam as maiores taxas de deposição do arame tubular, pois este processo responde com excelência aos quesitos de qualidade, produtividade e maiores recursos operacionais. Entretanto quando comparado ao arame sólido podemos dizer que o arame tubular tem um custo mais elevado na relação custo/peso do metal depositado [04].

5.2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

5.2.3.1 LARGURA MÉDIA DO CORDÃO

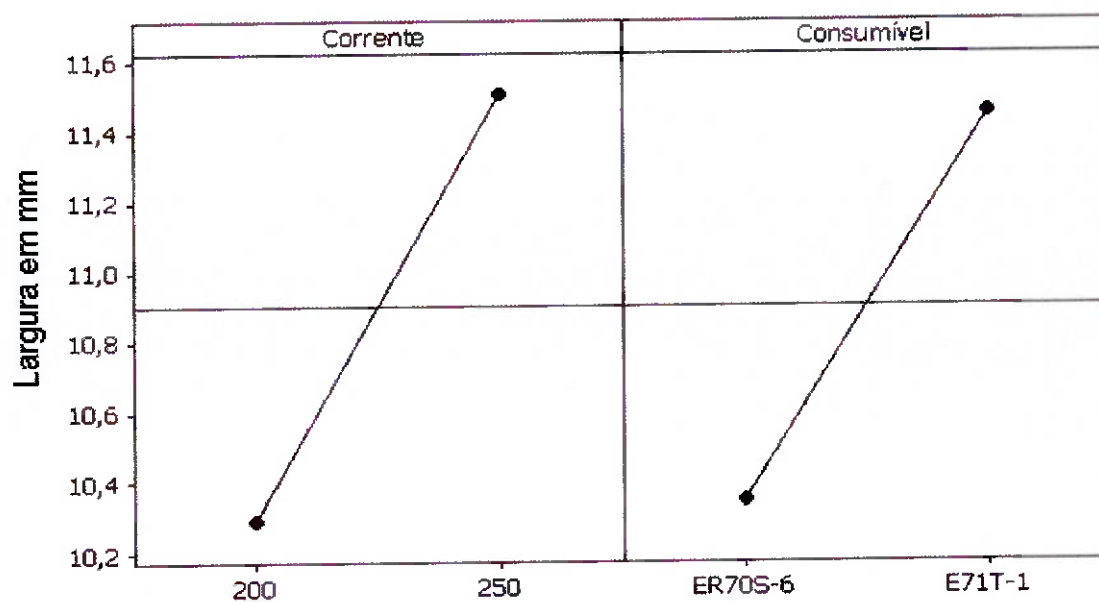


Figura 5.3 - Gráfico dos principais efeitos para a largura média.

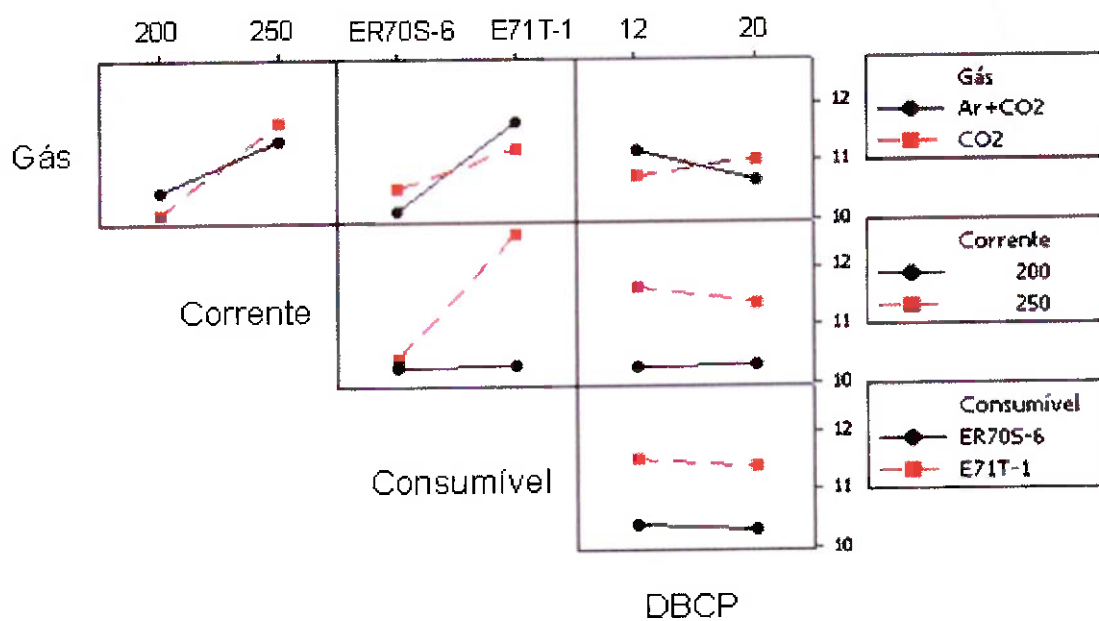


Figura 5.4 - Gráfico de interação para a largura média.

Neste experimento a corrente provocou um falso efeito de aumento da largura dos cordões feitos com o arame sólido. Observando as macrografias dos arames sólidos, notou-se a ocorrência de algumas sobreposições, que provocaram o aumento da largura dos cordões. Nas macrografias das figuras 5.5 e 5.6 pode-se observar um cordão com sobreposição e outro sem, ambos com a mesma DBCP e o mesmo gás de proteção.

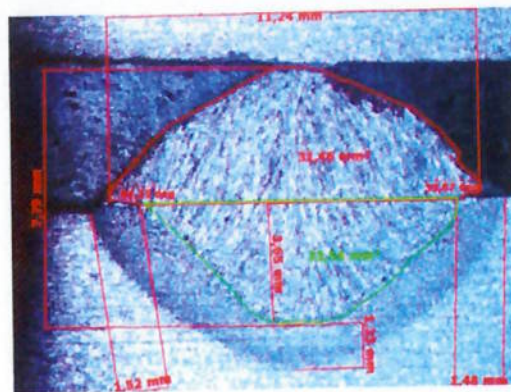


Figura 5.5 - Largura do cordão = 11,24 mm (com sobreposição). Macrografia do cordão nº 45 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 20 mm, 31 V, corrente de 228 A e CO₂ como gás de proteção.

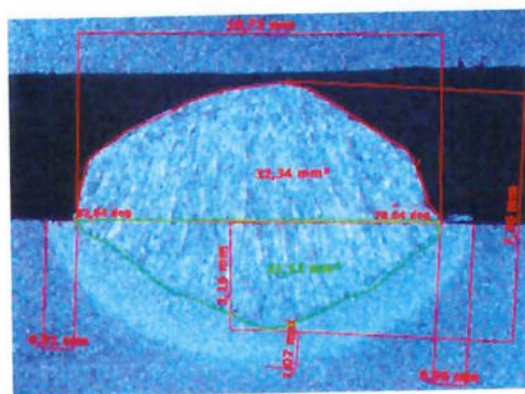


Figura 5.6 - Largura do cordão = 10,73 mm. Macrografia do cordão nº 31 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 20 mm, 30 V, corrente de 200 A e CO₂ como gás de proteção.

Na soldagem do arame tubular o aumento da corrente teve forte influência na largura do cordão, é o que pode ser observado nas figuras 5.7 e 5.8.

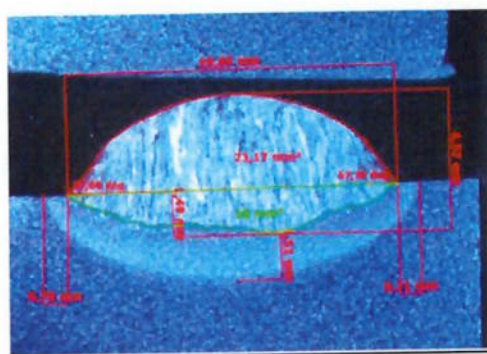


Figura 5.7 - Largura do cordão = 8,56 mm. Macrografia do cordão nº 80 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 20 mm, 27 V, corrente de 200 A e CO₂ como gás de proteção.

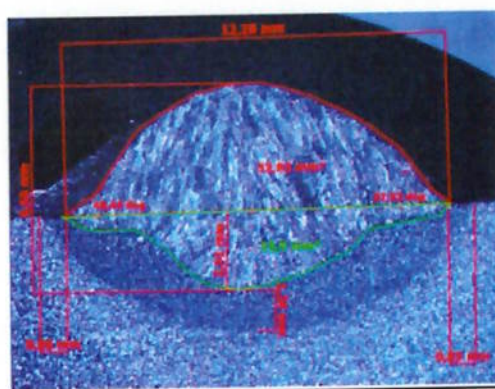


Figura 5.8 - Largura do cordão = 12,28 mm. Macrografia do cordão nº 92 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 20 mm, 26 V, corrente de 250 A e CO₂ como gás de proteção

Comparando-se os cordões do arame sólido e do tubular, para mesma DBCP e gás, observou-se que em 200 A os cordões tiveram a mesma largura, porém em 250 A o aumento da largura ocorreu apenas no arame tubular, dadas as diferenças na seção transversal dos dois arames e conseqüentemente na densidade de corrente e resistência elétrica, maiores no arame tubular, que provocou maior aquecimento do arame na soldagem (figuras 5.9 e 5.10).

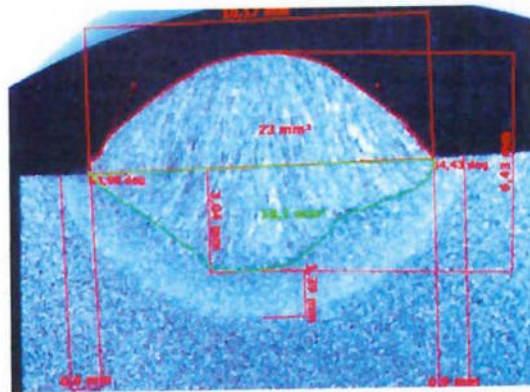


Figura 5.9 - Largura do cordão = 10,17 mm. Macrografia do cordão nº 2 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 12 mm, 25 V, corrente de 230 A e Mistura de Ar+25%CO2 como gás de proteção

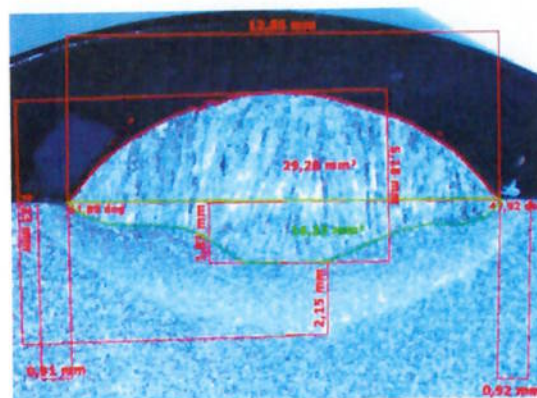


Figura 5.10 - Largura do cordão = 12,85 mm. Macrografia do cordão nº 62 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 12 mm, 28 V, corrente de 252 A e Mistura de Ar+25%CO2 como gás de proteção

A mudança da DBCP não produziu interação com as variáveis corrente e consumível. Apenas o gás de proteção produziu interação com as outras variáveis (corrente, consumível e DBCP), sendo que em todas as situações o CO₂ teve maior potencial de aumentar a largura do cordão que a mistura Ar+25%CO₂.

5.2.3.2 ALTURA MÉDIA DO CORDÃO

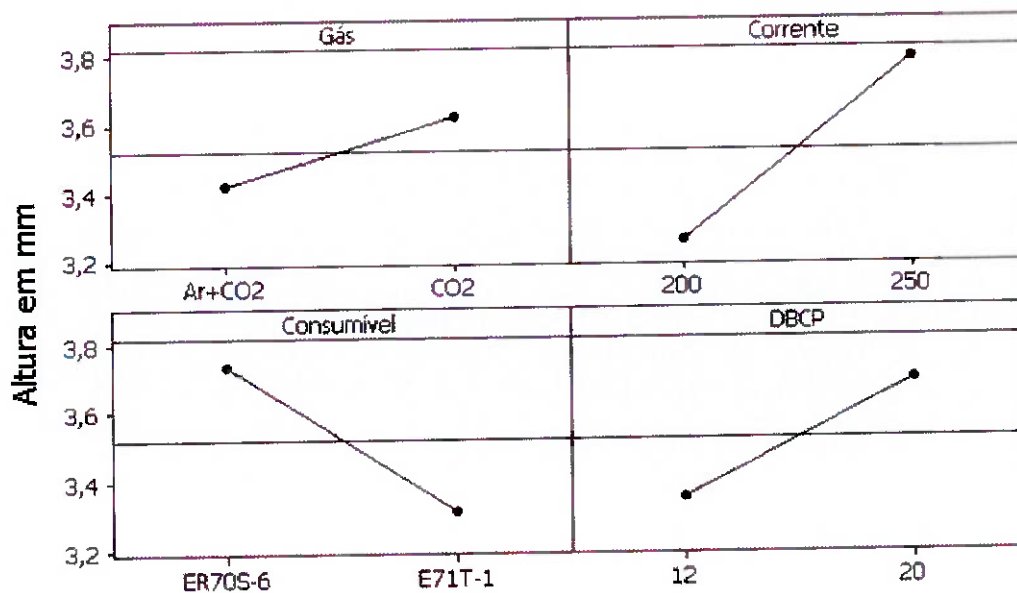


Figura 5.11 - Gráfico dos principais efeitos para a altura média.

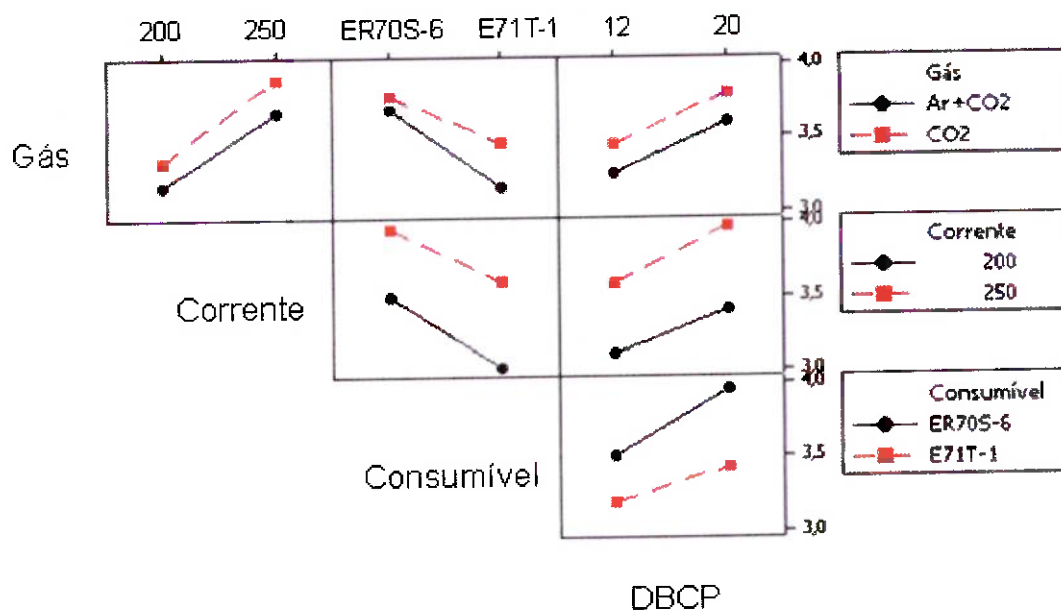


Figura 5.12 - Gráfico de interação para a altura média.

Em geral os cordões feitos com o arame tubular tiveram menor altura, comparado ao arame sólido. Individualmente, todas as variáveis (corrente, gás de proteção, DBCP e consumível) tiveram efeito sobre a altura dos cordões. A DBCP e a corrente foram diretamente proporcionais à altura do cordão. Também o CO₂ teve maior efeito para aumentar a altura do cordão do que a mistura Ar+25%CO₂. As figuras 5.13 e 5.14 exemplificam estes efeitos. Não houve grande interação entre gás, corrente e DBCP para os dois consumíveis, com efeito na altura do cordão

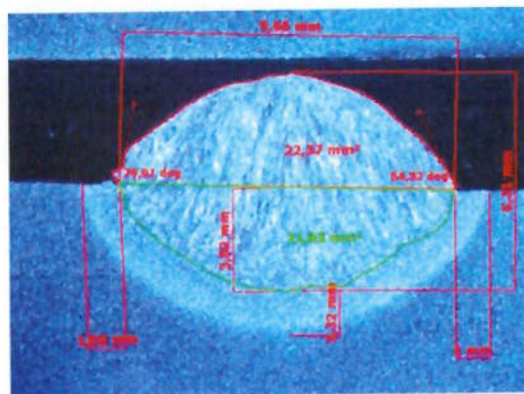


Figura 5.13 - Altura do cordão = 3,29 mm. Macrografia do cordão nº 01 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 12 mm, 28 V, corrente de 230 A e Mistura de Ar+25%CO₂ como gás de proteção

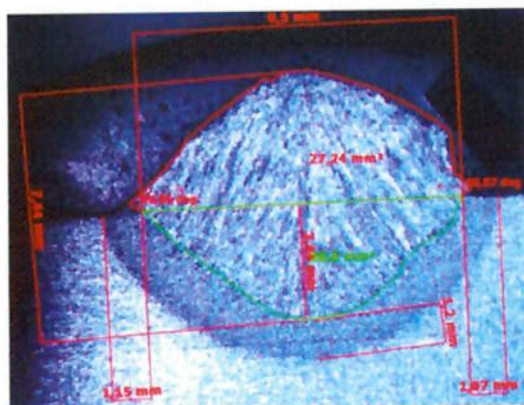


Figura 5.14 - Altura do cordão = 3,95 mm. Macrografia do cordão nº 45 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 20 mm, 31 V, corrente de 228 A e CO₂ como gás de proteção.

5.2.3.3 PENETRAÇÃO MÉDIA DO CORDÃO

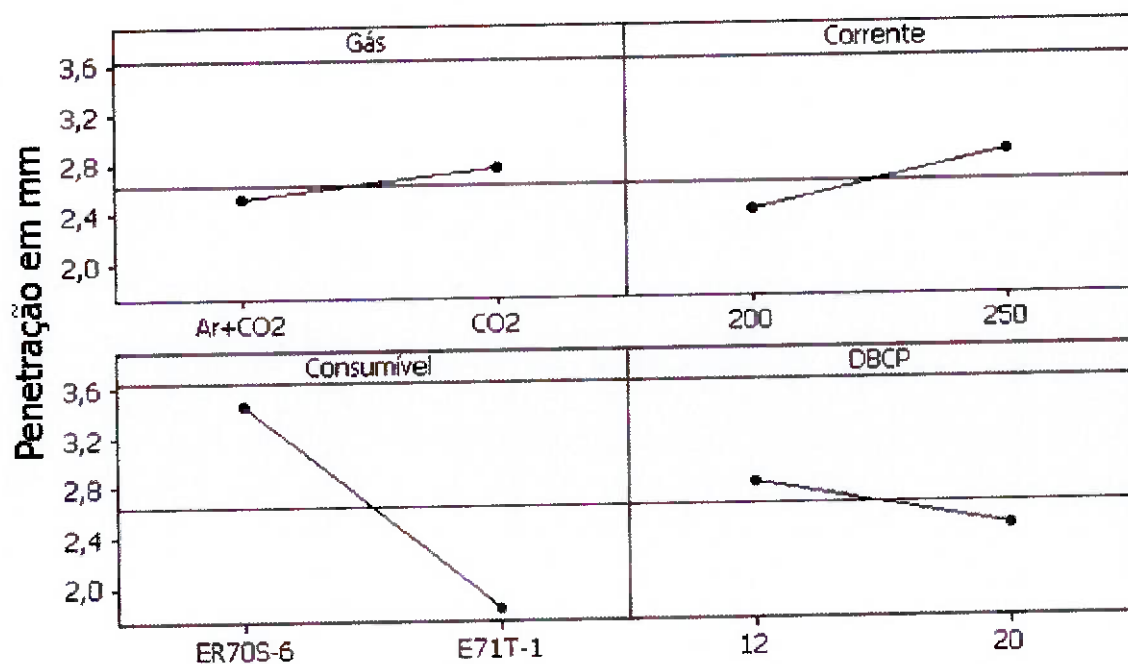


Figura 5.15 - Gráfico dos principais efeitos para a penetração média.

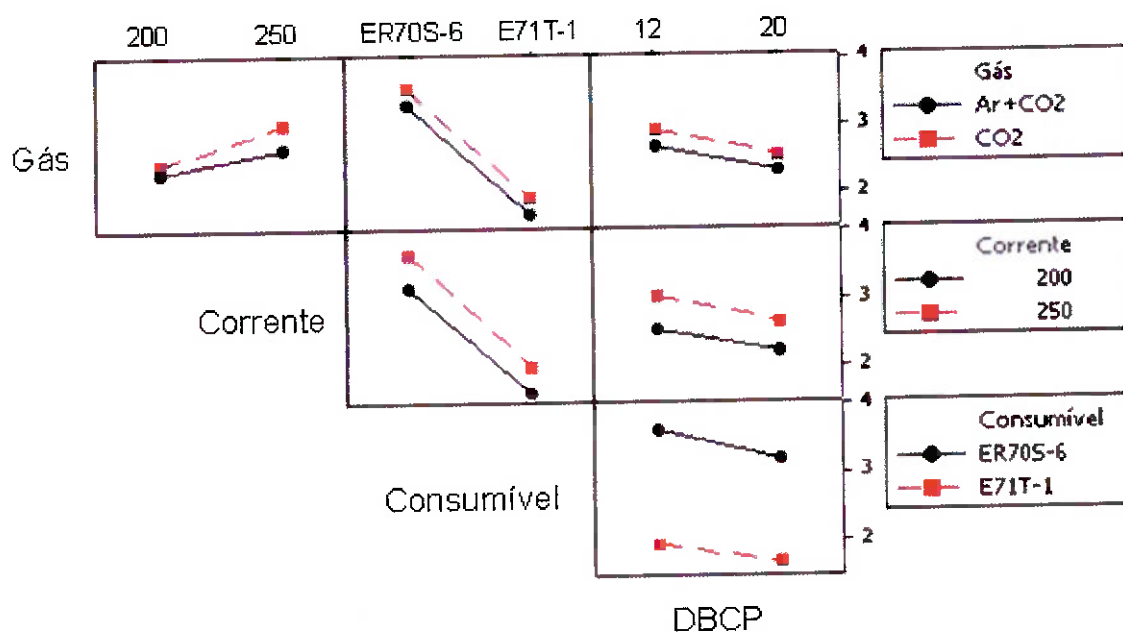


Figura 5.16 - Gráfico de interação para a penetração média.

Em geral o arame tubular apresentou menor penetração comparada ao arame sólido. As variáveis que tiveram efeito diretamente proporcional sobre a penetração, nos dois arames, foram o CO₂ e a intensidade de corrente. A DBCP teve efeito inversamente proporcional.

Nos gráficos das interações notamos que, dentro dos parâmetros do experimento, da mesma forma que na altura do cordão, não houve interações significativas para a penetração. As figuras 5.17 e 5.18 exemplificam cordões feitos com o arame sólido e com o arame tubular, com grandes diferenças de penetração.

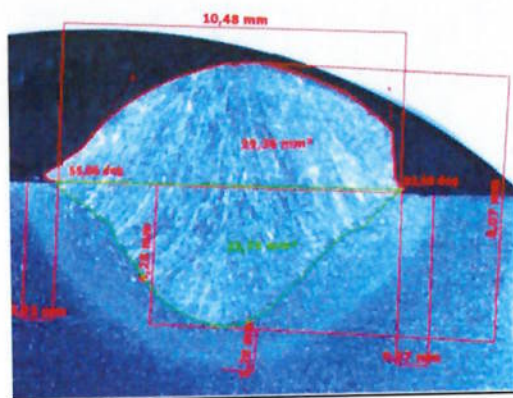


Figura 5.17 - Penetração do cordão = 4,28 mm. Macrografia do cordão nº 21 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 12 mm, 30 V, corrente de 200 A e CO₂ como gás de proteção.

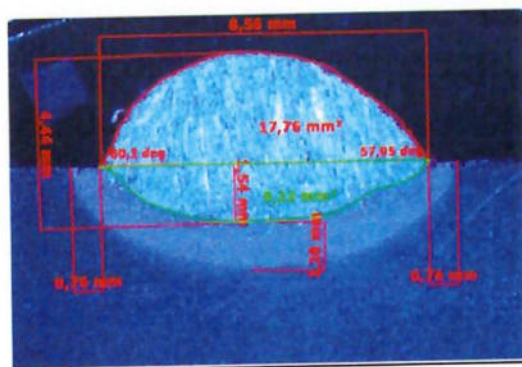


Figura 5.18 - Penetração do cordão = 1,54 mm. Macrografia do cordão nº 56 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 12 mm, 25 V, corrente de 200 A e CO₂ como gás de proteção.

5.2.3.4 MÉDIA DOS ÂNGULOS DO REFORÇO

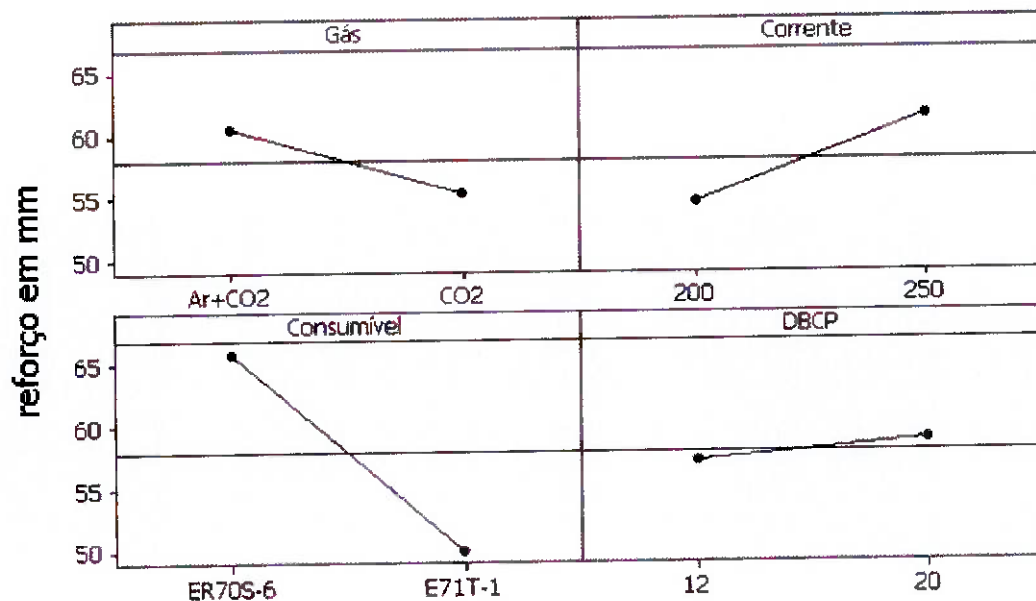


Figura 5.19 - Gráfico dos principais efeitos para o ângulo do reforço médio.

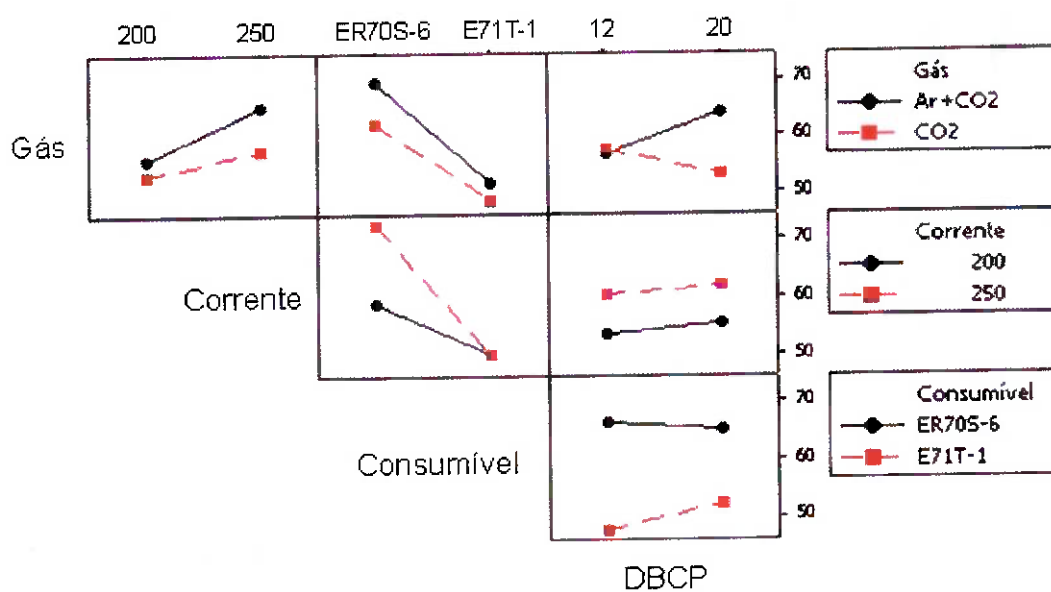


Figura 5.20 - Gráfico de interação para o ângulo do reforço médio.

Os ângulos do reforço esquerdo e direito dos cordões soldados com o arame sólido, ficaram maiores do que os soldados com o arame tubular.

Com o uso do CO₂ houve uma redução no ângulo do reforço, mesmo com o aumento da altura do cordão, como mostra as figuras 5.21 e 5.22.

Uma das principais interações ocorreu com o gás e a DBCP, que com 12 mm ambos os gases apresentaram ângulos de reforços semelhantes, porém com a DBCP de 20 mm o CO₂ provocou a redução do ângulo, enquanto que a mistura provocou aumento do ângulo. A outra principal interação foi entre a corrente e o consumível, pois de 200 a 250 A o tubular permaneceu com o mesmo ângulo de reforço, enquanto que o sólido, ao baixar a corrente de 250 A para 200 A, reagiu com um significativo aumento no ângulo do reforço.

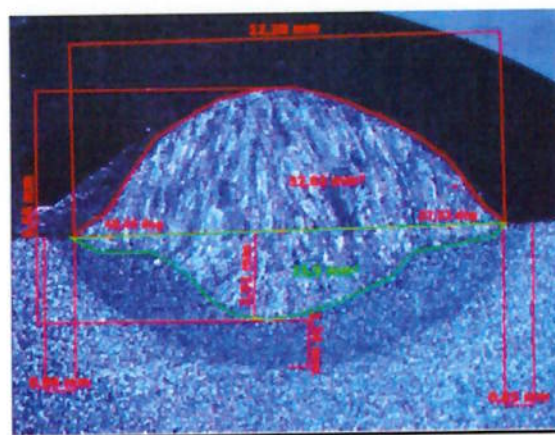


Figura 5.21 - Ângulo do reforço Médio = 38,98°. Macrografia do cordão nº 92 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 20 mm, 26 V, corrente de 250 A e CO₂ como gás de proteção.

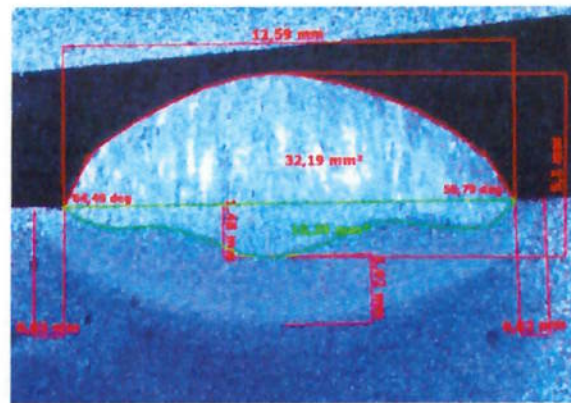


Figura 5.22 - Ângulo do reforço = 60,64°. Macrografia do cordão nº 86 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 20 mm, 26 V, corrente de 247 A e Ar+25%CO₂ como gás de proteção.

5.3. MEDIDA DA TAXA DE DEPOSIÇÃO

5.3.1 TAXA DE DEPOSIÇÃO

5.3.1.1 TAXA DE DEPOSIÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA COM O ARAME SÓLIDO ER70S-6

Tabela 5.5 - Tabela da taxa de deposição do arame sólido ER70S-6.

Nº do cordão	DBCP	GÁS	Tensão de Arco (V)	Corrente pré ajustada (A)	Corrente média no oscilograma (A)	Taxa de deposição (Kg/h)
1	12	75/25	28	200	230	3,732
2			28		230	3,696
3			28		230	3,731
7	12	CO2	30	200	210	4,387
8			30		200	4,295
9			30		200	4,039
13	12	75/25	28	250	270	4,932
14			28		253	4,702
15			28		245	4,654
19	12	CO2	29	250	242	4,692
20			30		247	4,788
21			30		200	4,361
25	20	75/25	29	200	200	3,935
26			30		204	3,708
27			30		194	3,903
31	20	CO2	30	200	200	4,809
32			30		200	4,414
33			34		200	6,380
37	20	75/25	29	250	230	4,486
38			28		250	5,408
39			29		250	5,623
43	20	CO2	30	250	210	4,951
44			30		200	4,830
45			31		228	5,281

5.3.1.2 TAXA DE DEPOSIÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA COM O ARAME TUBULAR E71T-1C

Tabela 5.6 - Tabela da taxa de deposição do arame tubular E71T-1C.

Nº do cordão	DBCP	GÁS	Tensão de Arco (V)	Corrente pré ajustada (A)	Corrente média no oscilograma (A)	Taxa de deposição (Kg/h)
49	12	75/25	27	200	213	3,890
50			27		205	3,867
51			26		219	3,830
55	12	CO2	25	200	190	2,964
56			25		190	3,021
57			25		190	2,947
61	12	75/25	26	250	247	4,401
62			25		252	4,601
63			26		246	4,555
67	12	CO2	27	250	257	5,724
68			27		251	5,651
69			27		242	5,553
73	20	75/25	27	200	178	3,488
74			27		190	3,876
75			27		200	3,735
79	20	CO2	28	200	200	4,056
80			27		200	3,989
81			27		200	3,963
85	20	75/25	26	250	220	5,172
86			26		247	5,252
87			26		225	5,322
91	20	CO2	25	250	250	4,907
92			26		250	5,719
93			28		250	5,763

5.3.1.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

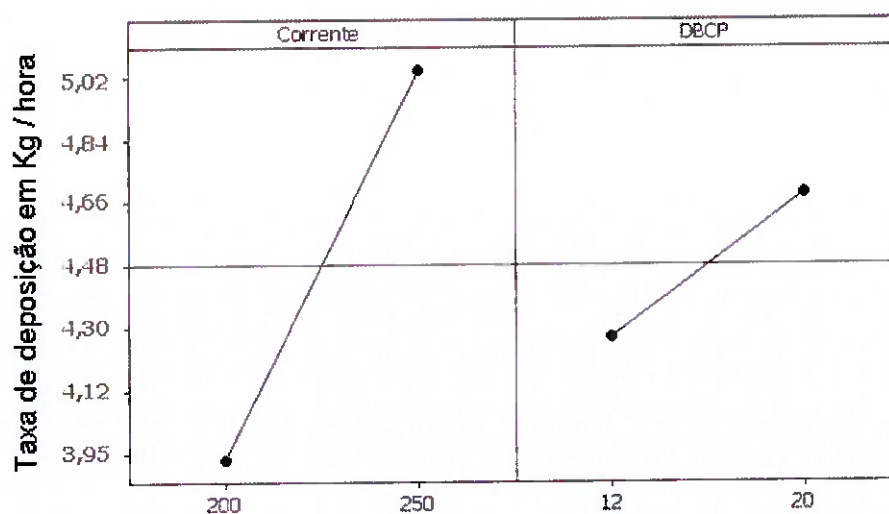


Figura 5.23 - Gráfico dos principais efeitos para a taxa de deposição.

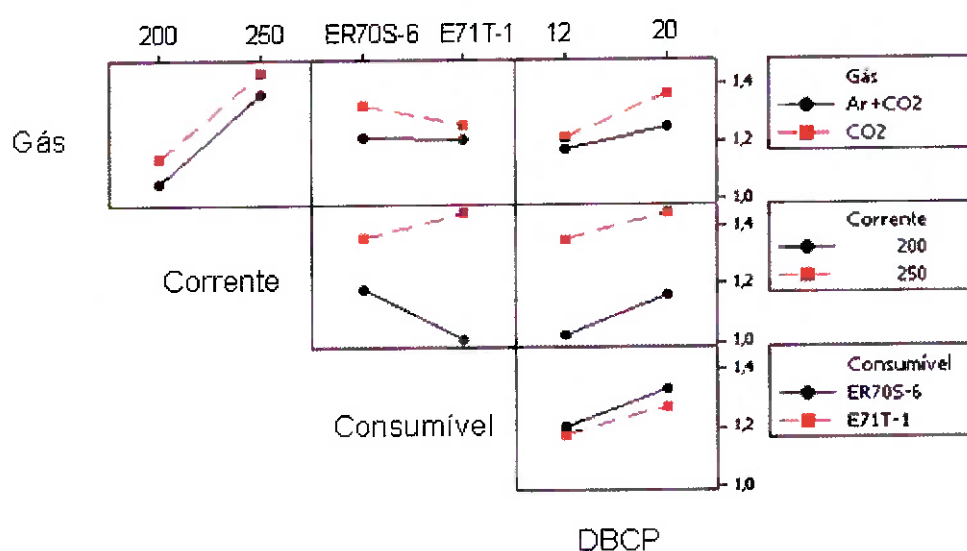


Figura 5.24 - Gráfico de interação para a taxa de deposição.

As variáveis que provocaram os maiores efeitos sobre a taxa de deposição nos dois arames foram a corrente e a DBCP. A taxa de deposição foi diretamente proporcional ao aumento da DBCP e da corrente.

A principal interação foi entre a corrente e os consumíveis, pois em corrente de 200 A o arame sólido apresentou melhor taxa de deposição que o arame

tubular. Entretanto em corrente de 250 A, embora os dois arames melhorassem esta taxa, o aumento conseguido com o arame tubular foi tão significativo que ele passou a ter taxa de deposição maior que o arame sólido.

5.3.2 EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO

5.3.2.1 EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO DO ARAME SÓLIDO ER70S-6

Tabela 5.7 - Tabela da eficiência de deposição do arame sólido ER70S-6.

Nº do cordão	DBC	GÁS	Tensão de Arco (V)	Corrente pré ajustada (A)	Corrente média no oscilograma (A)	Eficiência de Deposição (%)
1	12	75/25	28	200	230	93%
2			28		230	93%
3			28		230	94%
7	12	CO2	30	200	210	93%
8			30		200	92%
9			30		200	92%
13	12	75/25	28	250	270	94%
14			28		253	93%
15			28		245	94%
19	12	CO2	29	250	242	94%
20			30		247	94%
21			30		200	94%
25	20	75/25	29	200	200	93%
26			30		204	93%
27			30		194	91%
31	20	CO2	30	200	200	94%
32			30		200	93%
33			34		200	93%
37	20	75/25	29	250	230	94%
38			28		250	94%
39			29		250	94%
43	20	CO2	30	250	210	94%
44			30		200	94%
45			31		228	94%

5.3.2.2 EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO DOS CORDÕES DO ARAME TUBULAR E71T-1C

Tabela 5.8 - Tabela da eficiência de deposição do arame tubular E71T-1C.

Nº do cordão	DBCP	GÁS	Tensão de Arco (V)	Corrente pré ajustada (A)	Corrente média no oscilograma (A)	Eficiência de Deposição (%)
49	12	75/25	27	200	213	80%
50			27		205	81%
51			26		219	81%
55	12	CO2	25	200	190	82%
56			25		190	88%
57			25		190	88%
61	12	75/25	26	250	247	81%
62			25		252	81%
63			26		246	81%
67	12	CO2	27	250	257	80%
68			27		251	79%
69			27		242	79%
73	20	75/25	27	200	178	81%
74			27		190	81%
75			27		200	80%
79	20	CO2	28	200	200	79%
80			27		200	79%
81			27		200	79%
85	20	75/25	26	250	220	80%
86			26		247	80%
87			26		225	79%
91	20	CO2	25	250	250	79%
92			26		250	80%
93			28		250	79%

5.3.2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

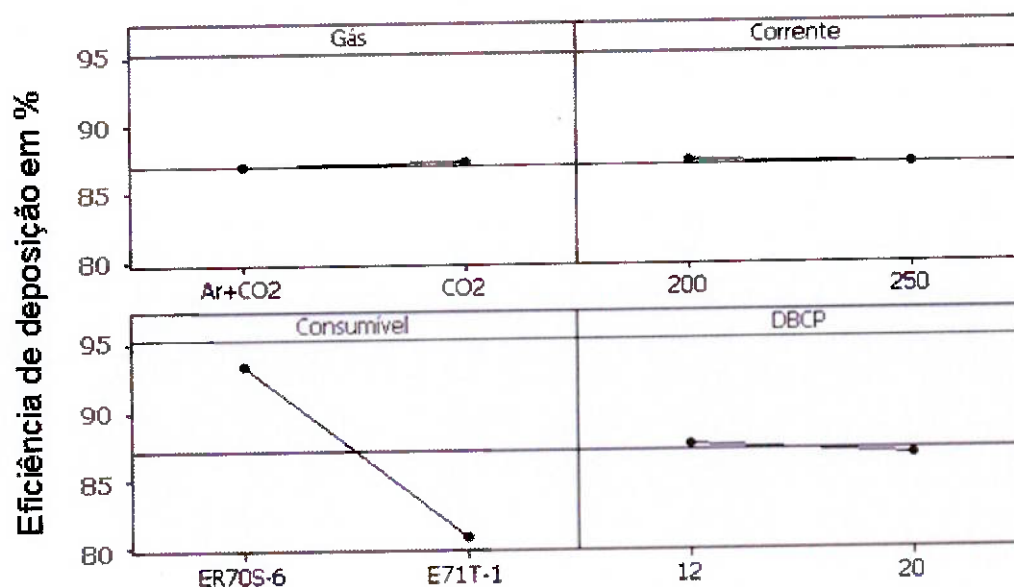


Figura 5.25 - Gráfico dos principais efeitos para a eficiência de deposição.

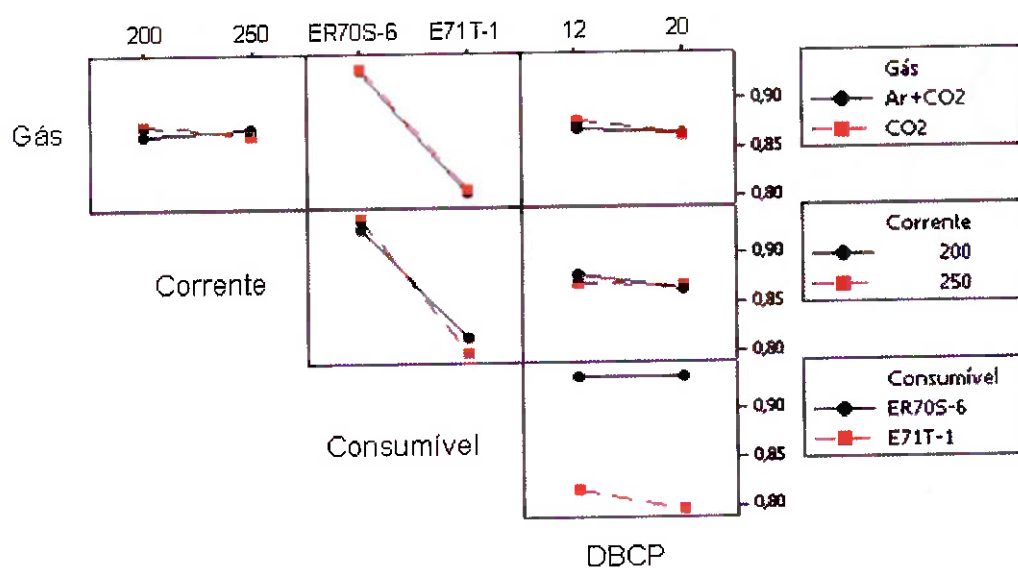


Figura 5.26 - Gráfico de interação para a eficiência de deposição.

Em geral a eficiência de deposição do arame sólido foi maior do que a do tubular. Essas diferenças permaneceram praticamente inalteradas ou com alterações pouco significativas na presença de CO₂ e mistura Ar+25%CO₂ e também nos dois níveis de corrente (200 e 250 A).

5.4. MEDIDA DA DILUIÇÃO

5.4.1 DILUIÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA COM O ARAME SÓLIDO ER70S-6

Tabela 5.9 – Tabela do percentual de diluição média dos cordões do arame sólido ER70S-6.

Nº do cordão	DBCP (mm)	Corrente pré ajustada (A)	Corrente média no oscilograma (A)	Gás	Diluição Média (%)
1	12	200	230	75/25	46,63
2			230		
3			230		
7	12	200	210	CO2	47,16
8			200		
9			200		
13	12	250	270	75/25	45,10
14			253		
15			245		
19	12	250	242	CO2	44,07
20			247		
21			200		
25	20	200	200	75/25	42,26
26			204		
27			194		
31	20	200	200	CO2	42,85
32			200		
33			200		
37	20	250	230	75/25	39,03
38			250		
39			250		
43	20	250	210	CO2	39,76
44			200		
45			228		

5.4.2 DILUIÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA FEITOS COM O ARAME TUBULAR E71T-1C

Tabela 5.10 Tabela do percentual de diluição média dos cordões do arame tubular E71T-1C.

Nº do cordão	DBCP (mm)	Corrente pré ajustada (A)	Corrente média no oscilograma (A)	GÁS	Diluição Média (%)
49	12	200	213	75/25	34,15
50			205		
51			219		
55	12	200	190	CO2	34,06
56			190		
57			190		
61	12	250	247	75/25	33,92
62			252		
63			246		
67	12	250	257	CO2	37,59
68			251		
69			242		
73	20	200	178	75/25	27,97
74			190		
75			200		
79	20	200	200	CO2	31,83
80			200		
81			200		
85	20	250	220	75/25	25,75
86			247		
87			225		
91	20	250	250	CO2	32,15
92			250		
93			250		

5.4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

5.4.3.1 DILUIÇÃO MÉDIA NO CORDÃO

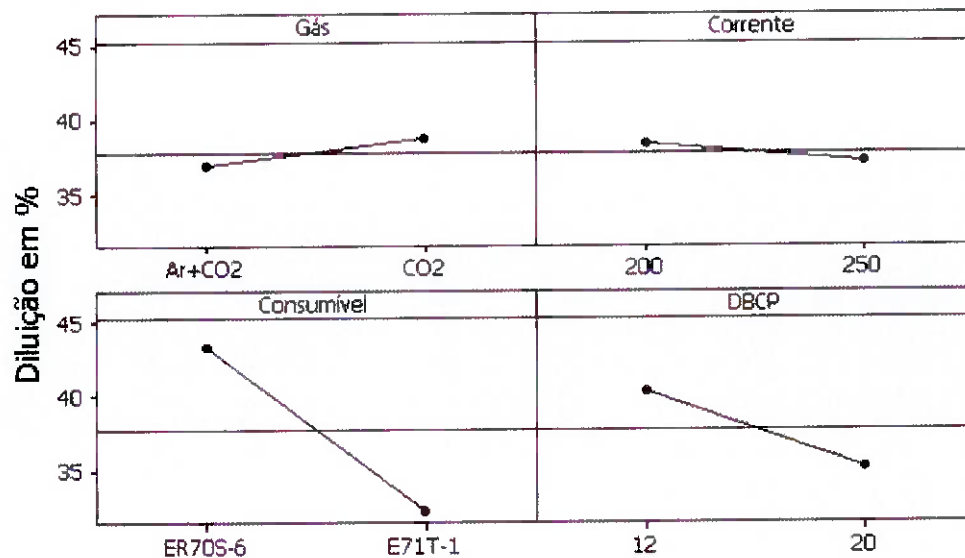


Figura 5.27 - Gráfico dos principais efeitos para a diluição média.

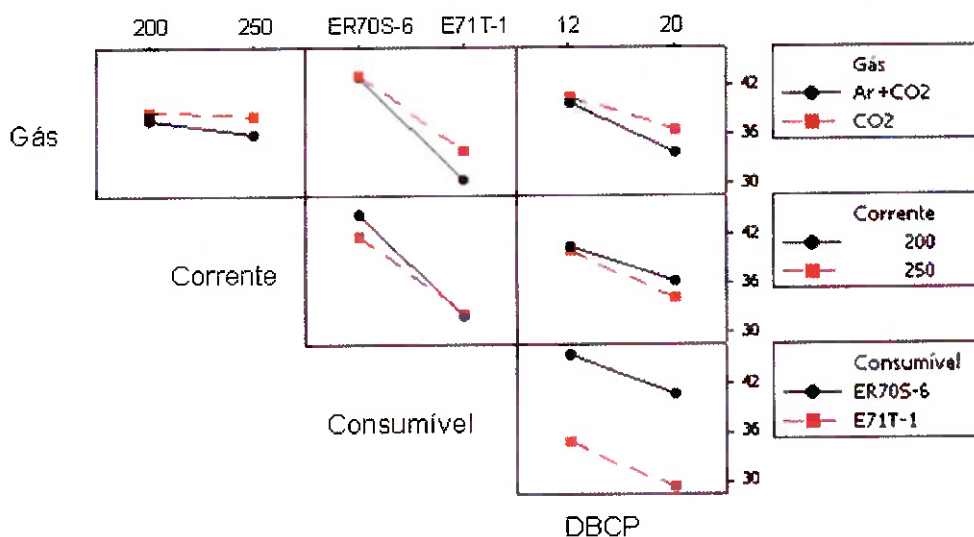


Figura 5.28 - Gráfico de interação para a diluição média.

O arame sólido apresentou maior diluição comparado ao tubular. As principais variáveis que produziram efeito sobre a diluição foram o gás (o CO2 provocou maior diluição) e a DBCP, que é inversamente proporcional à diluição.

O arame ER70S-6 apresentou a mesma diluição com CO₂ e mistura, enquanto o E71T-1C apresentou pequeno aumento na diluição quando alterado de mistura para CO₂. O E71T-1C não apresentou mudança na diluição nos dois níveis de corrente (200 e 250 A), enquanto que o ER70S-6 apresentou ligeira redução na diluição quando aumentada a corrente de 200 para 250 A (devido ao aumento da área do reforço do cordão, provocada pelo aumento da corrente, conforme citado na análise da largura do cordão). As figuras 5.29 e 5.30 ilustram as diferenças dos dois arames na diluição.

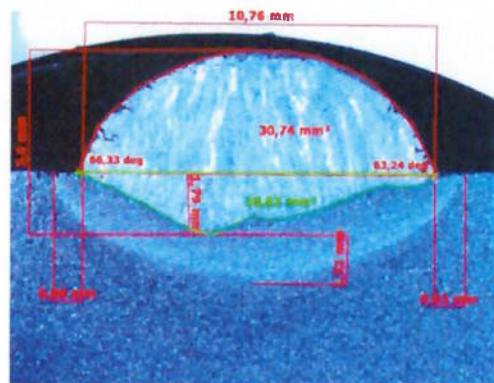


Figura 5.29 - Diluição de 26,6 %. Macrografia do cordão n° 87 feito com o arame E71T-1C, DBCP de 20 mm, 26 V, corrente de 225 A e mistura de Ar+25%CO₂ como gás de proteção.

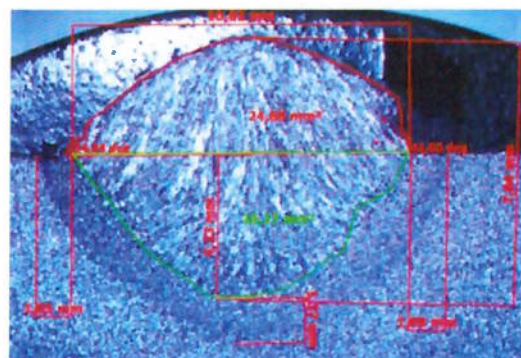


Figura 5.30 - Diluição de 53,4 %. Macrografia do cordão n° 7 feito com o arame ER70S-6, DBCP de 12 mm, 30 V, corrente de 210 A e CO₂ como gás de proteção.

5.5. CÁLCULO DO DIÂMETRO DA GOTA

5.5.1 DIÂMETRO MÉDIO DA GOTA NO ARAME SÓLIDO ER70S-6

Tabela 5.11 – Tabela do diâmetro médio da gota para o arame ER70S-6.

Nº do cordão	DBCP	GÁS	Tensão de Arco (V)	Corrente pré ajustada (A)	Corrente média no oscilograma (A)	Diâmetro médio da gota (mm)
1	12	75/25	28	200	230	1,500
2			28		230	
3			28		230	
7	12	CO2	30	200	210	1,880
8			30		200	
9			30		200	
13	12	75/25	28	250	270	1,474
14			28		253	
15			28		245	
19	12	CO2	29	250	242	1,698
20			30		247	
21			30		200	
25	20	75/25	29	200	200	1,761
26			30		204	
27			30		194	
31	20	CO2	30	200	200	2,159
32			30		200	
33			34		200	
37	20	75/25	29	250	230	1,427
38			28		250	
39			29		250	
43	20	CO2	30	250	210	1,661
44			30		200	
45			31		228	

5.5.2 DIÂMETRO MÉDIO DA GOTA NO ARAME TUBULAR E71T-1C

Tabela 5.12 – Tabela do diâmetro médio da gota para o arame E71T-1C.

Nº do cordão	DBCP	GÁS	Tensão de Arco (V)	Corrente pré ajustada (A)	Corrente média no oscilograma (A)	Diâmetro médio da gota (mm)
49	12	75/25	27	200	213	1,885
50			27		205	
51			26		219	
55	12	CO2	25	200	190	1,759
56			25		190	
57			25		190	
61	12	75/25	26	250	247	2,069
62			25		252	
63			26		246	
67	12	CO2	27	250	257	2,471
68			27		251	
69			27		242	
73	20	75/25	27	200	178	1,695
74			27		190	
75			27		200	
79	20	CO2	28	200	200	1,959
80			27		200	
81			27		200	
85	20	75/25	26	250	220	1,506
86			26		247	
87			26		225	
91	20	CO2	25	250	250	1,787
92			26		250	
93			28		250	

5.5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

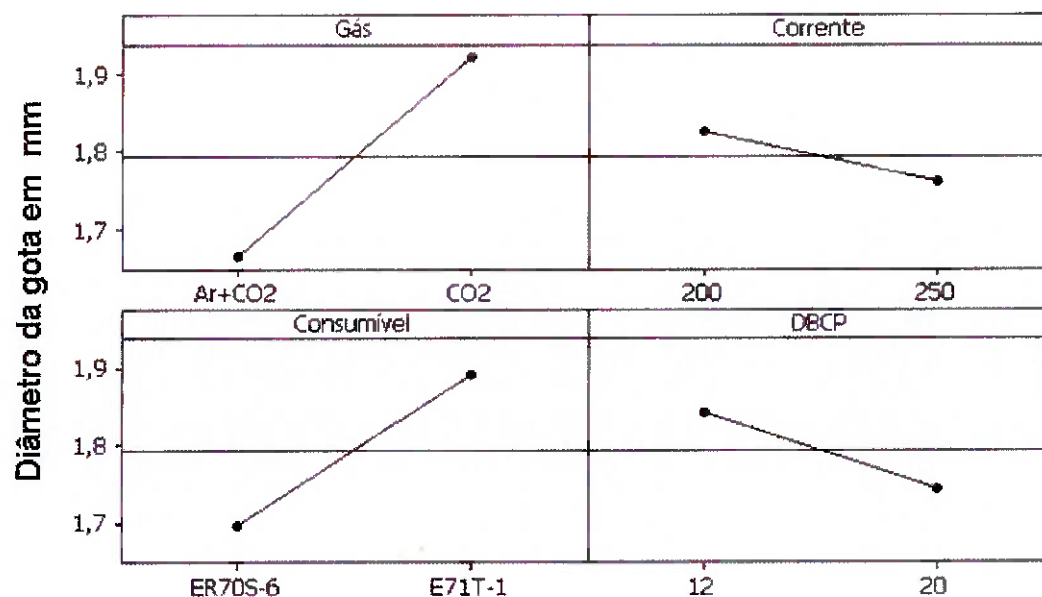


Figura 5.31 - Gráfico dos principais efeitos para o diâmetro da gota.

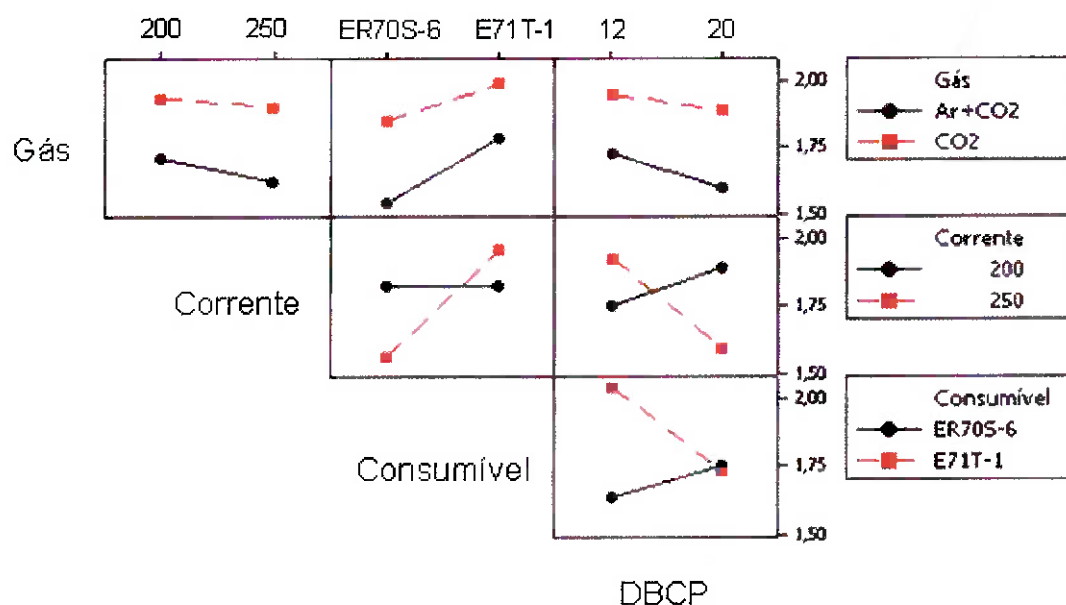


Figura 5.32 - Gráfico de interação para o diâmetro da gota.

Em média o arame tubular apresentou gotas de maior diâmetro comparado ao arame sólido. Neste experimento tiveram relação inversamente proporcional ao

tamanho da gota, a corrente e a DBCP. Com a mudança da mistura para o CO₂, a gota aumentou consideravelmente de diâmetro.

Em 200 A o arame sólido apresentou diâmetro da gota igual ao arame tubular, porém em 250 A o arame sólido apresentou diâmetro da gota menor enquanto o tubular apresentou gotas maiores.

Com a DBCP em 20 mm praticamente os dois arames se igualaram no tamanho das gotas, mas em DBCP de 12 mm o E71T-1C apresentou gotas maiores, enquanto o ER70S-6, gotas menores.

Em 200 A, quando se aumentou a DBCP de 12 para 20 mm, as gotas aumentaram de diâmetro, porém em 250 A ocorreu o contrário, as gotas diminuíram.

5.6. FREQUENCIA DE DESTACAMENTO DA GOTA

5.6.1 FREQUÊNCIA DE DESTACAMENTO DA GOTA NO ARAME SÓLIDO ER70S-6

Tabela 5.13 – Tabela do destacamento da gota para o arame ER70S-6.

Nº do cordão	DBCP	GÁS	Tensão de Arco (V)	Corrente pré ajustada (A)	Corrente média no oscilograma (A)	Freq. de destacamento de gotas (gotas/seg)
1	12	75/25	28	200	230	75
2			28		230	75
3			28		230	75
7	12	CO2	30	200	210	80
8			30		200	45
9			30		200	25
13	12	75/25	28	250	270	105
14			28		253	90
15			28		245	110
19	12	CO2	29	250	242	75
20			30		247	110
21			30		200	35
25	20	75/25	29	200	200	65
26			30		204	50
27			30		194	35
31	20	CO2	30	200	200	50
32			30		200	50
33			34		200	20
37	20	75/25	29	250	230	100
38			28		250	135
39			29		250	130
43	20	CO2	30	250	210	75
44			30		200	65
45			31		228	85

5.6.2 FREQUÊNCIA DE DESTACAMENTO DA GOTA NO ARAME TUBULAR E71T-1C

Tabela 5.14 – Tabela do diâmetro médio da gota para o arame E71T-1C.

Nº do cordão	DBCP	Gás	Tensão de Arco (V)	Corrente pré ajustada (A)	Corrente média no oscilograma (A)	Freq. de destacamento de gotas (gotas/seg)
49	12	75/25	27	200	213	25
50			27		205	65
51			26		219	40
55	12	CO2	25	200	190	35
56			25		190	50
57			25		190	30
61	12	75/25	26	250	247	15
62			25		252	90
63			26		246	40
67	12	CO2	27	250	257	15
68			27		251	40
69			27		242	30
73	20	75/25	27	200	178	55
74			27		190	75
75			27		200	35
79	20	CO2	28	200	200	30
80			27		200	25
81			27		200	70
85	20	75/25	26	250	220	130
86			26		247	85
87			26		225	105
91	20	CO2	25	250	250	75
92			26		250	120
93			28		250	35

5.6.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

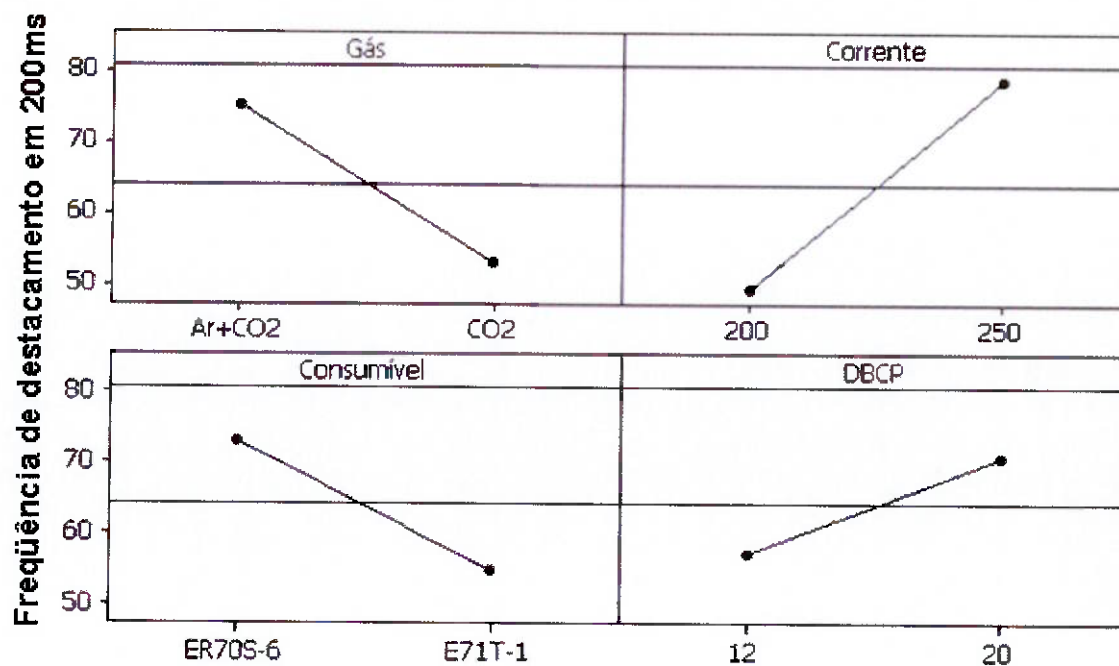


Figura 5.33 - Gráfico dos principais efeitos para o destacamento da gota.

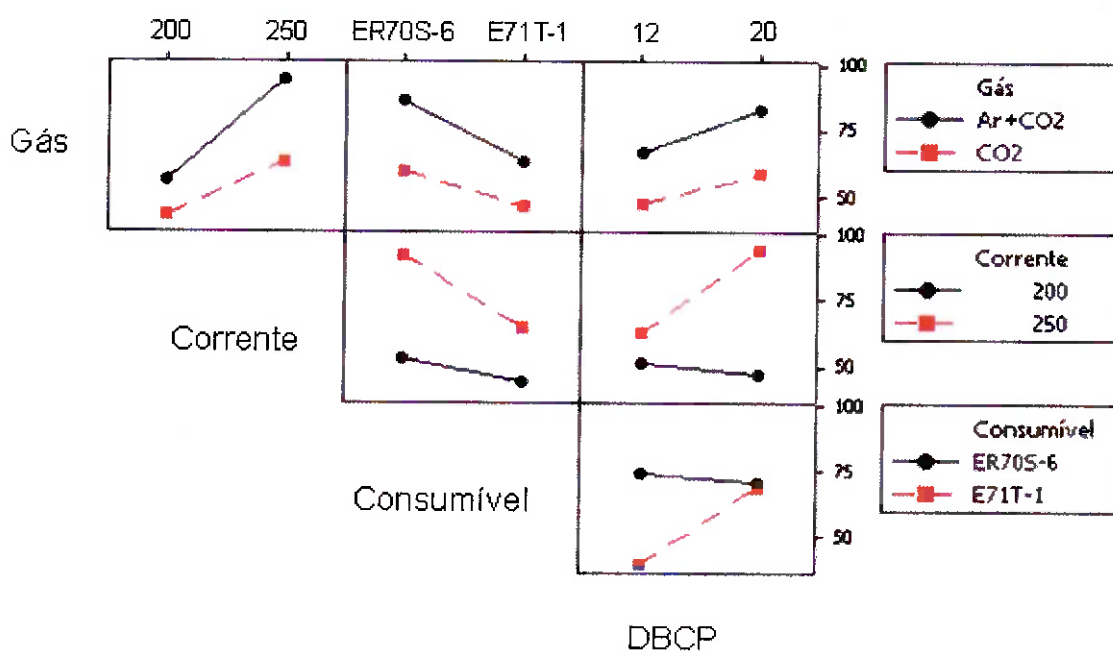


Figura 5.34 - Gráfico de interação para o destacamento da gota.

As principais variáveis que tiveram efeito na frequência de destacamento de gotas do experimento foram o gás, a corrente, a DBCP e o consumível. O arame sólido teve maior frequência de destacamento comparado ao tubular. O CO₂ promoveu redução na frequência de destacamento, enquanto que a DBCP e a corrente se comportaram diretamente proporcionais a esta.

As principais interações foram observadas com a DBCP que com 20 mm apresenta frequência de destacamento igual entre os dois arames e com a DBCP de 12 a frequência do arame sólido teve um ligeiro aumento e a do tubular uma queda considerável. Outra interação observada foi entre a DBCP e a corrente. Em 200 A as alterações de DBCP não promoveram grandes mudanças na frequência de destacamento de gotas, mas em 250 A, ao passar de 12 para 20 mm de DBCP, a frequência aumentou consideravelmente.

6. CONCLUSÕES

Com base no experimento realizado, nas condições como materiais, tipos de equipamentos, parâmetros, tipo de transferência metálica, posição de soldagem, tipos e bitola dos consumíveis utilizados, foram possíveis tirar estas conclusões. Porém vale lembrar que, estes resultados valem apenas para os arames produzidos por estes fabricantes.

- Em média o arame sólido ER70S-6 apresenta altura de cordão 11% maior que o arame tubular E71T-1C.
- A altura do cordão, para os dois arames, é diretamente proporcional ao aumento da corrente e da DBCP.

- Com a mudança do gás de proteção, de mistura Ar+25%CO₂ para CO₂, a altura do cordão aumenta em média 3% no arame sólido e em média 9% no arame tubular.
- Em média o arame sólido ER70S-6 tem penetração 91% maior do que o arame tubular E71T-1C.
- A penetração do cordão, para os dois arames, é diretamente proporcional ao aumento da corrente e inversamente proporcional ao aumento da DBCP.
- Com a mudança do gás de proteção, de mistura Ar+25%CO₂ para CO₂, a penetração do cordão aumenta em média 7% no arame sólido e em média 15% no arame tubular.
- Em média o arame sólido ER70S-6 tem ângulo de reforço 57% maior do que o arame tubular E71T-1C.
- O ângulo do reforço do cordão, para os dois arames, é diretamente proporcional ao aumento da corrente e também ao aumento da DBCP.
- Com a mudança do gás de proteção, de mistura Ar+25%CO₂ para CO₂, o ângulo do reforço do cordão diminui em média 12% no arame sólido e em média 6% no arame tubular.
- A corrente elétrica é a principal variável para o aumento da taxa de deposição e é diretamente proporcional ao aumento da mesma. Com a mudança de 200 para 250 A, o arame sólido aumenta a sua taxa de deposição em 15% e o arame tubular aumenta em 44 %.
- A DBCP é outra variável que influencia na taxa de deposição, e é diretamente proporcional ao seu aumento. Com a mudança da DBCP de

12 para 20 mm, o arame sólido apresenta aumento de 11% na taxa de deposição e o arame tubular apresenta aumento de 8%.

- Em 200 A o arame sólido apresenta taxa de deposição em média 17% maior do que o arame tubular, porém em 250 A o arame tubular apresenta taxa de deposição 7% maior do que o arame sólido
- Com a mudança do gás de proteção, de mistura Ar+25%CO₂ para CO₂, a taxa de deposição aumenta em média 9% no arame sólido e em média 4% no arame tubular.
- Em média o arame sólido ER70S-6 apresenta uma eficiência de deposição de 93% e o arame tubular E71T-1C uma eficiência de deposição de 81%.
- Tanto no arame sólido ER70S-6 como no arame tubular E71T-1C, as variáveis como gás, DBCP e corrente, não interferem na eficiência de deposição.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A comparação entre os arames eletrodos sólidos e tubulares é um tema rico que pode ser explorado em muitos outros trabalhos. Um deles poderia ser a comparação entre os fumos gerados por cada um, pois se sabe que o fluxo contido no interior do arame tubular é capaz de gerar mais fumos, porém existem poucos trabalhos que mostram quantitativamente estes resultados. Pode ser estudada ainda a aplicação do arame tubular e do arame sólido com outras misturas de gases, outros tipos de transferência metálica e com outros tipos de fontes de energia, como as de arco controlado e pulsado.

Também, como complemento a este trabalho entre o arame tubular e sólido, podem ser estudadas as taxas de deposição e de eficiência de deposição para outras posições de soldagem, como a vertical ascendente e a horizontal em ângulo.

Finalmente, para que este trabalho ficasse mais completo, seria muito interessante a continuidade deste mesmo tema tratado aqui, estendendo a comparação entre as taxas de deposição e eficiência de deposição, passando a estudar também o custo do metal depositado, onde envolveria todos os custos da produção como mão de obra, insumos, equipamentos e EPI's.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AWS, AMERICAN WELDING SOCIETY. Specification for Carbon Steel Electrodes for Flux Cored Arc Welding, A5.20-79. 1995.
2. MARQUES, Paulo Villani. "Tecnologia da Soldagem". Ed O Lutador, 1991. PP 213 – 236.
3. OLIVEIRA, M.E.J. Estudo dos Parâmetros para Soldagem Fora de Posição com Arame Tubular, Dissertação de Mestrado, UFMG, Março, 101 p. 2002.
4. ARAÚJO, W.R. Comparação entre Soldagem Robotizada com Arame Sólido e Metal Cores – A Ocorrência do Finger, Dissertação de Mestrado, UFMG, 79p. 2004.
5. WELDING HANDBOOK. (1991) Mota et al, 1998; Bracarense, 2000; Joaquim, 2001; Oliveira, 2002; Fortes, 2004; Starling et al, 2005.
6. BRACARENSE, A.Q., Processo de Soldagem por Arame Tubular, Apostila UFMG, Maio, Belo Horizonte, pp.88-104. 2000.
7. WIDGERY, D.J. Flux Cored Wire: An Update, Welding and Metal Fabrication, April, pp.88-94. 1988.
8. MARQUES, P.V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A.Q. Soldagem Tecnologia e Fundamentos, Ed UFMG, pp. 233-262. 2005.
9. BARRA, S.R. Influência do Processo MIG-MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida, Dissertação de

- Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Agosto, p. 248. 2003.
10. LITTLE, K, et AL. Select the Best Shielding Gás Blend for the Application, Welding Journal, USA, p.21-27. 1990.
 11. Catálogo eletrônico SERFLEX Comércio e Serviços de Equipamentos Industriais Ltda. Imagens obtidas em:
http://www.serflex.com.br/wiew_produtos.php?pro_id=1993 e
http://www.serflex.com.br/wiew_produtos.php?pro_id=2147. Acesso em: 03 de Nov. 2012.
 12. WANG, W.; LIU, S.; JONES, J.E. Flux Arc Welding: Arc Signals, Processing and Metal Transfer Characterization, Welding Journal, v82, nº3, pp.369s-377s. 1995.
 13. MEDEIROS, C. R.; QUINTINO, L.; SANTOS, O. F. J. Estudo da Aptidão dos Arames Tubulares á Soldagem MIG com Transferência Controlada, Soldagem & Materiais, vol.66, nº5, pp.44-49. 1989.
 14. WIDGERY, D. Tubular Wire Welding. First published, England, Woodhead Publishing Limited, pp. 1-25. 1994.
 15. HOUDCROFT, P.; JOHN, R. Welding and cutting – Woodhead – Faulkner Ltd., Cambridge, England. 1988.
 16. BRANDI, S.B. Análise da Transferência Metálica na Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido, Dissertação de Mestrado, USP, p. 5-24. 1988.

17. JONES, L. A.; EAGAR, T. W.; LANG, J. H.. Magnetic forces acting on molten drops in gas metal arc welding. IOP Publishing Ltd, p. 93-106, 1998.
18. REVIEWING THE "CLASSIFICATION OF METAL TRANSFER" Documento do Instituto Internacional de Soldagem Nº XII-1888-06. 2006.
19. LANCASTER, J., F., The Physics of Welding, Pergamon Press, International Institute of Welding, 1984.
20. IIW Classification des divers modes de transfert du metal em soudage à l'arc. Documento do Instituto Internacional de Soldagem Nº XII-535-77.
21. IORDACHESCU, D.; QUINTINO, L.. Steps toward a new classification of metal transfer in gas metal arc welding. Journal of Materials Processing Technology, p. 391-397, 2008.
22. WANG, P. C.. Modeling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding. J. Phys. D: Appl. Phys. 36, p. 1143-1152, 2003.
23. ASM. Gas-metal arc welding. Welding Handbook. 2.ed., v.6, p. 569-581. 1984.
24. LIN, Q.; LI, X.; SIMPSON, S. W.. Metal transfer measurements in gas metal arc welding. IOP Publishing Ltd, p. 347-353, 2001.
25. PRAVEEN, P.; YARLAGADDA P. K. D. V.; KANG, M. J., Advancements in pulse gas metal arc welding. Journal of Materials Processing Technology, p. 164-165, 2005.
26. ALLUM, C. J.. Metal transfer in arc welding as a varicose instabilidade: I - varicose instability in a current-carrying liquid cylinder with surface charge. Journal of Physics D: Applied Physics 18: p. 1431-1446, 1985.

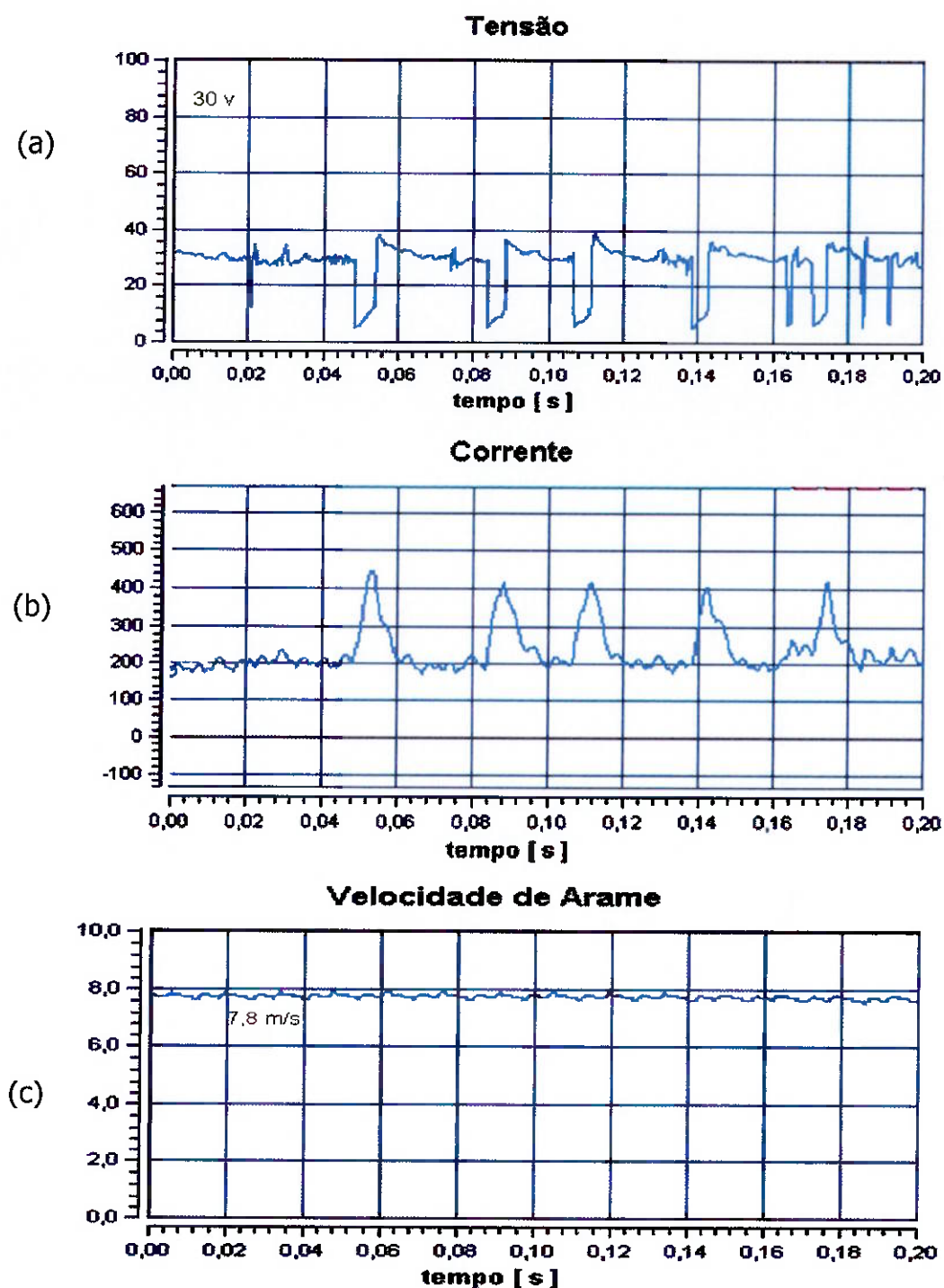
27. KIM, Y. S.; EAGAR, T. W.. Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding. Welding Research Supplement, p. 269-278, 1993.
28. WANG, F.; HOU, W. K.; HU, S. J.; KANNATEY-ASIBU, E.; SCHULTZ, W. W.; WANG, P. C.. Modeling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding. J. Phys. D: Appl. Phys. 36, p. 1143-1152, 2003.
29. VAIDYA, V. V.. Shielding gas mixtures for semiautomatic welds. Welding Journal, p. 43-48, September, 2002.
30. WANG, G.; HUANG, P.G; ZHANG, Y.M.. Numerical analysis of metal transfer in gas metal arc welding under modified pulsed current conditions. Metallurgical and Materials Transactions B., p. 857-865, October 2004.
31. SANTANA, I. J., Modelamento Matemático do processo de soldagem GMAW. Tese de doutorado, UFMG, Belo Horizonte, MG, 2010.
32. SCOTTI, A; PONOMAREV, V.. Soldagem MIG-MAG: Melhor Entendimento, Melhor Desempenho. São Paulo: Ed. Artliber, 284p. 2008.
33. FERRARESI, V. A., LUZ, T. S., BALSAMO, P. S. S. Análise da transferência metálica do arame tubular com proteção gasosa. III COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, v. 1, p. 1-10. Joinville, 2005.
34. LANCASTER, J. F. The physics of welding. 2.ed. Pergamon Press, International Institute of Welding, 340p. 1986.
35. AWS Welding Handbook - Welding Processes – Arc and gás welding and cutting, brazing and soldering. 8.ed. Miami. AWS, v. 2, 955p. 1991.
36. MODENESI, P. J. Transferência de metal na soldagem GMAW – Manual aula prática, UFMG. Belo Horizonte, 2004.

37. NENCHINSKY, V. A.. Electrode melting during arc welding with pulsed current. J. Phys. D: Appl. Phys. 31, p. 2797 - 2802, 1998.
38. SCOTTI, A., CLARK, D. E., KENNEY, K. Mapeamento da transferência metálica em MIG com aço inoxidável. ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, Associação Brasileira de Soldagem. Fortaleza, 1998.
39. JONES, L. A.; EAGAR, T. W.; Lang, J. H.. Images of steel electrode in Ar 2%O₂ shielding during constant current gas metal arc welding. Welding Journal, 77 (4), p. 135-141, 1998.
40. HERMANS M. J. M.; DEN OUDEN G.. Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding. Welding Research Supplement, p.137-141, april, 1999.
41. SCOTTI, A., CLARK, D. E., KENNEY, K. Mapeamento da transferência metálica em MIG com aço inoxidável. ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, Associação Brasileira de Soldagem, Fortaleza, 1998.
42. FIGUEIREDO, K. M., FERRARESI, V. A., Mapas de transferência metálica em soldagem MIG de alumínio. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 1, Curitiba, 2001.
43. CAMPOS, P. T., Caracterização mecânica e micro estrutural de juntas soldadas pelos processos MIG-MAG (GMAW) e arame tubular (FCAW). Dissertação de mestrado, PUCPR, Curitiba, PR, 2005.
44. JACOBSEN, N.. Monopulse investigation of drop detachment in pulsed gas metal arc welding. IOP Publishing Ltd, p.783-797, 1992.

45. CHOI, S K.; YOO, C. D.; KIM Y. S.. The dynamic analysis of metal transfer in pulsed current gas metal arc welding. IOP Publishing Ltd, p. 207-215, 1998.
46. SUBRAMANIAM, S.; WHITE, D. R.; JONES, J. E.; LYONS, D. W.. Experimental approach to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW. Welding Research supplement, p. 166-172, 1999.
47. WU, C. S.; CHEN, M. A.; LI, S. K.. Analysis of excited droplet oscillation and detachment in active control of metal transfer. ELSEVIER, Computational Materials Science 31, p. 147-154, 2004.
48. MODENESI, P. J.. Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais (Apostila). Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalurgia da UFMG, 146 p. 2007.
49. NENCHINSKY, V. A.. Electrode melting during arc welding with pulsed current. J. Phys. D: Appl. Phys. 31, p. 2797 - 2802, 1998.
50. GARCIA, R. P.; SCOTTI, A. Uma metodologia para análises comparativas da capacidade produtiva entre arames maciços (MIG-MAG) e tubulares (Eletrodo Tubular). ENCONTRO NACIONAL DA TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, Associação Brasileira de Soldagem, Recife. 2010.

ANEXO I – OSCILOGRAMAS DOS CORDÕES DE SOLDA

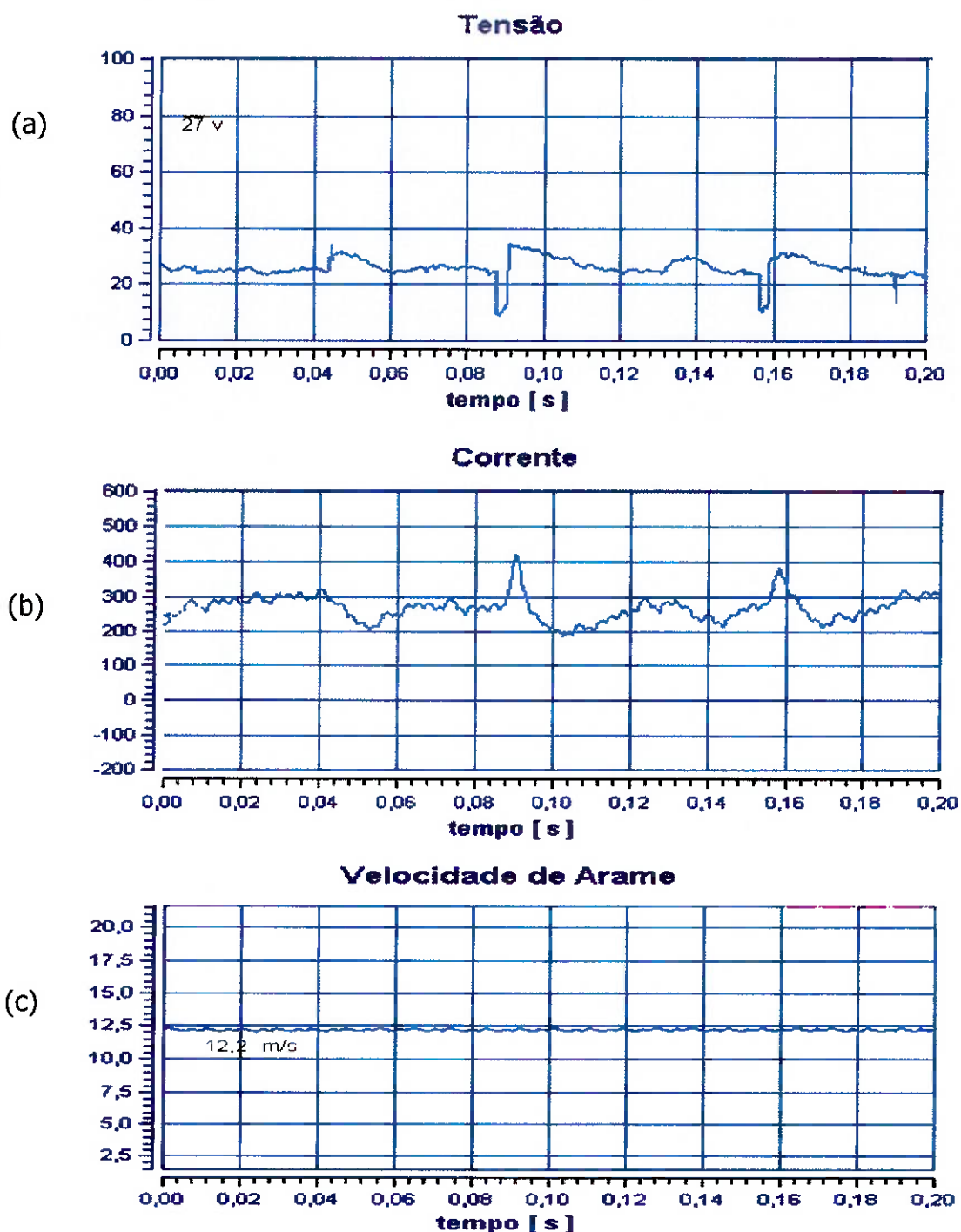
CORDÃO DE SOLDA Nº8 (arame sólido)



Oscilogramas do cordão de solda nº8 de (a) tensão, (b) corrente e (c) Velocidade de arame. Soldagem com o arame ER70S-6, DBCP de 12 mm, 200 A, 30 V e CO₂. Número de curtos circuitos: 09 cc em 200 ms (09 gotas em 200 ms).

ANEXO II- OSCILOGRAMAS DOS CORDÕES DE SOLDA

CORDÃO DE SOLDA Nº67 (arame tubular)



Oscilogramas do cordão de solda nº67, (a) tensão, (b) corrente e (c) Velocidade de arame. Soldagem com o arame E71T-1C, DBCP de 12 mm, 257 A, 27 V e CO₂. Número de curtos circuitos: 3 cc em 200 ms.